

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Testování břitových destiček při obrábění materiálu

Inconel 625

The Testing of Cutting Inserts at Machining of Material

Inconel 625

Student:

Bc. Miloslav Cileček

Vedoucí diplomové práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Miloslav Cileček**

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Testování břitových destiček při obrábění materiálu Inconel 625  
The Testing of Cutting Inserts at Machining of Material Inconel 625

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Návrh experimentální činnosti.
3. Realizace experimentů a měření.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] HAVRILA, Michal; ZAJAC, Jozef; BRYCHTA, Josef; JURKO, Jozef; *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [4] ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: **Bc. Filip Kramer**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

  
Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2013

Miloslav Cileček

podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem, byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2013

Miloslav Cileček

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Miloslav Cileček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Mírov 4, Mírov, 78901

**ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

CILEČEK, M. *Testování břitových destiček při obrábění materiálu Inconel 625*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 71 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá testováním břitových destiček při soustružení materiálu Inconel 625. V teoretické části je práce zaměřena na niklové slitiny a jejich obrábění. Celkem byly testovány 3 druhy vyměnitelných břitových destiček z hlediska jejich opotřebení při obrábění a kvality obrobeného povrchu. Testování bylo prováděno při podélném soustružení na CNC soustruhu Mori Seiki SL - 403 při konstantních řezných parametrech, kdy se měnil pouze posuv. V poslední části práce jsou uvedeny naměřené výsledky, na jejichž základě je provedeno vyhodnocení vyměnitelných břitových destiček a je proveden ekonomický rozbor z pohledu ceny jednotlivých břitových destiček.

**ANNOTATION OF MASTER THESIS**

CILEČEK, M. *The Testing of Cutting Inserts at Machining of Material Inconel 625*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2013, 71 p. Thesis head: Petrů, J.

This thesis deals with testing of cutting tips during the turning of the material Inconel 625. The theoretical part of the thesis is focused on the nickel-based alloys and their machining. Total three types of the cutting tips have been tested from the point of view of wear during the machining and quality of the machined surface. The testing was conducted during the straight turning by the CNC lathe Mori Seiki SL - 403 at the constant cutting parameters, it was changed the feed only. The measured results presented in the last part of the thesis are leading to the evaluation of the replaceable cutting tips and the economic analysis regarding the prices of the individual cutting tips.

# Obsah diplomové práce

<b>Seznam použitých symbolů a značek .....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Niklové slitiny .....</b>	<b>12</b>
1.1 Nikl .....	12
1.2 Vývoj niklových slitin .....	13
1.3 Rozdělení slitin niklu .....	14
1.3.1 Slitiny niklu pro běžné použití .....	14
1.3.2 Antikorozní slitiny .....	14
1.3.3 Žárupevné a žáruvzdorné slitiny .....	15
1.4 Chemické složení .....	15
1.4.1 Vliv jednotlivých prvků v niklových slitinách .....	16
1.5 Mikrostruktura niklových slitin .....	18
1.5.1 Fáze $\gamma$ - matrice .....	20
1.5.2 Vytvrzující fáze $\gamma'$ .....	20
1.6 Použití superslitin .....	21
<b>2. Technologie obrábění .....</b>	<b>23</b>
2.1 Obrobitelnost .....	23
2.2 Soustružení Ni superslitin .....	27
2.2.1 Volba řezného nástroje .....	27
2.2.2 Geometrie nástrojů .....	30
2.2.3 Řezné rychlosti a posuvy .....	32
2.2.4 Procesní kapaliny .....	34
<b>3. Opotřebení řezného nástroje .....</b>	<b>35</b>
3.1 Základní mechanismy opotřebení bříty .....	35
3.1.1 Typy (druhy) opotřebení na nástroji ze SK .....	37
3.2 Měření opotřebení .....	38
3.2.1 Přímé metody měření opotřebení .....	39
3.2.2 Nepřímé metody měření opotřebení .....	40
<b>4. Integrita povrchu .....</b>	<b>41</b>
4.1 Drsnost povrchu .....	41
4.1.1 Měření drsnosti povrchu .....	42

<b>5. Experimentální část .....</b>	<b>43</b>
5.1 Obráběcí stroj.....	43
5.2 Obráběný materiál.....	44
5.3 Volba řezných nástrojů a řezných materiálů.....	45
5.3.1 Použitý nožový držák.....	45
5.3.2 Použitá vyměnitelná břitová destička firmy Iscar s.r.o.....	46
5.3.3 Použitá vyměnitelná břitová destička firmy Sandvik Coromant s.r.o .....	46
5.3.4 Použitá vyměnitelná břitová destička firmy Seco Tools s.r.o.....	47
5.3.5 Volba řezných podmínek .....	48
5.4 Měření opotřebení.....	48
5.5 Výpočet objemu odebraného materiálu .....	50
5.6 Měření drsnosti povrchu .....	50
<b>6. Zpracování a srovnání výsledků měření.....</b>	<b>52</b>
6.1 Zpracování výsledků pro $f_{n1} = 0,3$ mm .....	53
6.2 Zpracování výsledků pro $f_{n2} = 0,5$ mm .....	58
<b>7. Technicko - ekonomické zhodnocení.....</b>	<b>63</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>67</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>69</b>

## Seznam použitých symbolů a značek

Značka	Název	Jednotka
A	tažnost	[ % ]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý	[ - ]
ANSI	American National Standards Institute	[ - ]
a <sub>p</sub>	hloubka řezu	[ mm ]
BCT	tetragonální prostorově středěná mřížka	[ - ]
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid chromitý	[ - ]
CVD	Chemical Vapour Deposition	[ - ]
ČSN EN ISO	Mezinárodní norma	[ - ]
d	průměr vepsané kružnice do VBD	[ mm ]
d <sub>i</sub>	průměr vepsané kružnice do VBD	[ mm ]
D	obráběný průměr	[ mm ]
D <sub>5m</sub>	průměr dotykové plochy na straně stroje	[ mm ]
FCC	kubická plošně středěná mřížka	[ - ]
f <sub>n</sub>	posuv na otáčku	[ mm ]
f <sub>l</sub>	funkční šířka nožového držáku	[ mm ]
HCL	kyselina chlorovodíková	[ - ]
HCP	hexagonální mřížka	[ - ]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kyselina sírová	[ - ]
iC	průměr vepsané kružnice do VBD	[ mm ]
KB	šířka výmolu	[ mm ]
Kf	vzdálenost výmolu od čela	[ mm ]
KM	střední vzdálenost výmolu	[ mm ]
KNB	kubický nitrid boru	[ - ]
KT	hloubka výmolu na čele	[ mm ]
l	délka břitů	[ mm ]
l	řezná délka	[ mm ]
l <sub>1</sub>	funkční délka nožového držáku	[ mm ]
L1 <sub>2</sub>	typ struktury mřížky	[ - ]
MC	primární karbid	[ - ]
M(C, N)	karbonitrid	[ - ]
M <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	borid	[ - ]
M <sub>6</sub> C	sekundární karbid	[ - ]
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	sekundární karbid	[ - ]



$M_{23}C_6$	sekundární karbid	[ - ]
$M_{23}(C, N)_6$	karbonitrid	[ - ]
n	otáčky vřetena	[min <sup>-1</sup> ]
n	počet měření	[ - ]
P	množství použitých destiček	[ks]
PVD	Physical Vapour Deposition	[ - ]
r	poloměr špičky nástroje	[°]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Rp <sub>0,2</sub>	mez kluzu	[MPa]
Rz	největší výška profilu	[μm]
r <sub>e</sub>	poloměr špičky nástroje	[°]
s	tloušťka destičky	[mm]
SCC	kubická prostorově středěná mřížka	[ - ]
SCT	tetragonální mřížka	[ - ]
SK	slinutý karbid	[ - ]
T <sub>AS</sub>	strojní čas	[min]
TCP	topologicky uspořádaná fáze	[ - ]
V	množství odebraného materiálu	[mm <sup>3</sup> ]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[ - ]
VB	opotřebení na hřbetě	[mm]
VB <sub>C</sub>	opotřebení v oblasti špičky nástroje	[mm]
VB <sub>N</sub>	opotřebení ve formě vrubu	[mm]
VB <sub>B</sub>	opotřebení přímé části ostří (průměrné)	[mm]
VB <sub>Bmax</sub>	opotřebení maximální	[mm]
v <sub>c</sub>	řezná rychlost	[m·min <sup>-1</sup> ]
VR	radiální opotřebení	[mm]
WC	karbid wolframu	[ - ]
$\bar{x}$	výběrový průměr	[mm]
x <sub>i</sub>	jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x	[mm]
γ	strukturní složka, základní tuhý roztok	[ - ]
γ <sub>o</sub>	ortogonální úhel čela	[°]
γ'	strukturní složka, vytvrzující fáze Ni <sub>3</sub> Al, Ni <sub>3</sub> Ti, Ni <sub>3</sub> (Al, Ti)	[ - ]
γ''	strukturní složka, vytvrzující fáze Ni <sub>3</sub> Nb Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[ - ]
ζ	nežádoucí fáze v superslitinách	[ - ]

$\eta$	nežádoucí fáze v superslitinách	[ - ]
$\kappa_r$	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
$\lambda_s$	úhel sklonu	[°]
$\mu$	nežádoucí fáze v superslitinách	[ - ]
$\sigma$	strukturní složka, intermetalická fáze	[ - ]

## Úvod

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou John Crane Sigma a. s., která byla založena britskou nadnárodní společností TI Group plc a českou společností Sigma Lutín a. s. v roce 1993. Od roku 1995 je John Crane Sigma a. s. držitelem certifikátu ISO 9002 od Lloyds Register Quality Assurance Ltd..

Předmětem činnosti této firmy je výroba, distribuce a prodej ucpávek a těsnících systémů pro chemický, petrochemický, potravinářský, papírenský, farmaceutický průmysl, energetiku a těžbu nerostných surovin. Firma dále vyrábí spojky pro přenos hnací síly rotačních strojů. Ve svém sídle v Lutíně nedaleko Olomouce firma vyrábí a zásobuje sesterské společnosti John Crane a stará se o zákazníky z České republiky a Slovenska.

Dnešní doba klade stále náročnější požadavky na životnost strojních dílů, na jejich materiály a vlastnosti. Především na součásti pracující v extrémních podmínkách. Tyto požadavky splňují především speciální niklové a titanové slitiny. Mezi tyto materiály patří Inconel, Hastelloy, Waspaloy, Nimonic nebo Titan. Jejich přednosti můžeme hledat především ve výrobě hnacích ústrojí, medicínské technice, chemickém a petrochemickém průmyslu, kosmonautice a letectví.

Vynikající mechanické vlastnosti těchto slitin způsobují zhoršení obrobitelnosti, hlavně z důvodu vysoké teploty, která vzniká na břitu nástroje. Dochází také ke zpevnění povrchové vrstvy a k rychlému opotřebení řezného nástroje, hlavně při obrábění vyššími rychlostmi. Na tyto požadavky musí reagovat výrobci destiček nástrojů, kteří vyvíjejí materiál destiček i nanášené povlaky, aby destičky dosahovali vhodných časů trvanlivosti a zůstala zachována co nejvhodnější integrita povrchu.

Technologie výroby soustružení je ve firmě John Crane Sigma a. s. jednou z nejdůležitějších metod výroby. Kladou se vysoké požadavky na řezné nástroje, řezné podmínky, parametry při obrábění, tuhost a stabilitu stroje.

Cílem práce je testování několika druhů břitových destiček při hrubovací operaci soustružení za použití řezných nástrojů, vhodných pro obrábění těžkoobrobitelných niklových slitin, tak abychom snížili výrobní časy, zlepšili efektivitu výroby a tím ušetřili náklady pro podnik.

## 1. Niklové slitiny

Slitiny niklu jsou cenné vzhledem k jejich odolnosti proti korozi a udržení si svých mechanických vlastností při extrémně vysokých teplotách, stejně jako u vysoce agresivních médií, mořské vody apod. Niklové slitiny se používají pro nejnáročnější strojní aplikace, kde odolávají poškození povrchu, erozi a otěru. [1]

Tyto slitiny jsou pevnější, houževnatější a tvrdší než většina slitin neželezných kovů a řada ocelí. Chemické a fyzikální vlastnosti jsou v celé řadě niklových slitin lepší než u čistého niklu. Nikl je významnou přísadou i základním materiálem slitin, s nimiž je možné se setkávat v nejrůznějších technických oborech. [1]

### 1.1 Nikl

Nikl je jedním z nejdůležitějších technických prvků. Chemická značka je Ni (lat. Niccolum). Je to bílý, feromagnetický, kujný a tažný kov. Má velmi dobrou korozní odolnost (kromě prostředí obsahující síru), stálost na vzduchu a dobré mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti, které činí z niklu důležitý a mnohostranně užívaný konstrukční materiál. Významnou vlastností Ni je vysoká houževnatost i při nízkých teplotách. Asi 60% Ni se spotřebuje jako přísada do slitinových ocelí, 25% tvoří slitiny niklu a zbylých 15% polotovary z čistého niklu. Čistý nikl se používá k povrchové ochraně jiných kovů před korozi, v elektronice nebo v raketové technice. V přírodě se nikl vyskytuje ve formě sulfidických, oxidických a křemičitanových minerálů. [2, 9]

Tab. 1.1 Charakteristika niklu [2, 9]

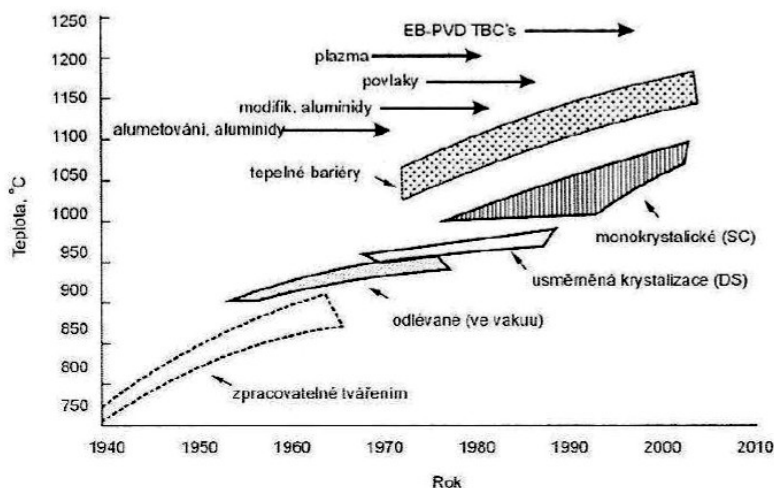
Název		Atomové číslo	Teplota tání	Teplota varu	Hustota [g·cm <sup>3</sup> ]	Hustota při teplotě tání [g·cm <sup>3</sup> ]
Nikl		28	1455°C	2913°C	8,908	7,81

## 1.2 Vývoj niklových slitin

Vývoj superslitin se datuje k období těsně před 1. světovou válku, kdy se začaly hledat materiály vhodné pro letecké motory. Nejprve se používaly korozivzdorné chromniklové oceli. Postupem času se však zvyšovaly požadavky na výkony motorů, proto byla potřeba vyvinout nové slitiny s lepšími vlastnostmi. Tento výzkum se ještě zvyšoval s rodícím se výzkumem turbín. [3]

Bylo zapotřebí najít vhodnou možnost zpevnění matrice. Časem se ukázalo vhodné zpevnění pomocí precipitace. Na začátku 20. století byl objeven zpevňující účinek titanu a hliníku u austenitických chrom-niklových ocelí. Podstata tohoto efektu intermetalika  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  označovaného jako  $\gamma'$ , byla objevena mnohem později a to v roce 1957 pomocí rentgenové difrakce. [3]

Superslitiny zaznamenaly prudký rozvoj i díky 2. světové válce a v roce 1940 byla patentována ve Velké Británii první niklová superslitina NIMONIC. V následujících letech bylo hlavním cílem dosáhnout vyššího objemového podílu zpevňující fáze  $\gamma'$  ve struktuře a snížení obsahu nežádoucích křehkých fází. Díky vysokým reaktivitám hliníku a titanu bylo nutno měnit výrobní technologie. V 50. letech se výrazně zlepšila kvalita superslitin a to díky zavedení vakuového tavení, zvýšil se podíl fáze  $\gamma'$ , ale klesala tvárnost, a proto bylo nezbytné slitinu odlévat. Jednou z nejdůležitějších aplikací jsou lopatky rotorů turbín, u kterých jsou požadované dobré creepové vlastnosti. Ty se výrazně zlepšily díky technice usměrněné krystalizace. Získala se tak kolumnární struktura krystalů orientovaných ve směru osy lopatky. S rozvojem slévárenských technologií se začaly uplatňovat monokrystaly. To jsou materiály, kterým chybí hranice zrn, mají vynikající creepové vlastnosti a posunuly tak provozní teploty znatelně výše. [3]



Obr. 1.1 Vývoj žárupevných slitin na bázi niklu [1]

### 1.3 Rozdělení slitin niklu [4, 5]

Konstrukční niklové slitiny je možné rozdělit do tří skupin:

1. Slitiny pro práci v běžných podmínkách
2. Antikorozní slitiny
3. Žárovzdorné a žárupevné slitiny

#### 1.3.1 Slitiny niklu pro běžné použití

Slitiny Ni-Mn (2% až 5% Mn) mají lepší odolnost proti korozi a to i za vyšších teplot v oxidačním a redukčním prostředí, které obsahují sloučeniny síry. Často se tyto slitiny používají na kontakty zapalovacích svíček.

Slitiny Ni-Si mají zvýšený obsah křemíku (9% Si) a dalších přísad jakou jsou prvky Cu, Fe, Cr, Co a Mn. Jako slitiny Ni-Mo (až 32% Mo + další přísady) mají vysokou odolnost v prostředích obsahujících kyseliny. Jsou odolné vůči studené i horké kyselině sírové. Používají se zejména v chemickém průmyslu.

Ve slitinách Ni-Be (cca 2% Be) se dosahuje po vytvrzení pevnosti až 1800 MPa při dostatečné tažnosti a bez snížení korozní odolnosti. Tyto slitiny se používají na výrobu pružin, forem pro vstřikování plastů a membrány pro teploty až 500°C.

Slitiny Ni-Al (4,5% Al) je možné precipitačně vytvrdit. Po tomto zpevnění dosahují pevnosti až 1350 MPa při tažnosti 7% a tvrdosti 380HB. Používají se na tažené a vytvrzované dráty. Další uplatnění mohou nacházet zejména při výrobě pump, hřídelí a oběžných kol.

Slitiny Ni-Cu patří k nejrozšířenějším slitinám niklu a jsou známy pod obchodním značením jako Monely. Současné Monely obsahují 29% až 32% Cu, plus malé množství přísad Si, Mn, Fe, Al. Mají výbornou odolnost proti korozi, dobrou houževnatost, pevnost a tepelnou vodivost. Z těchto slitin se vyrábějí ventily, čerpadla, námořní komponenty, chemická zařízení a tepelné výměníky. Komplexní Monely jsou vhodné i pro použití při vyšších teplotách.

#### 1.3.2 Antikorozní slitiny

Antikorozní slitiny se používají pro korozní podmínky, kde jiné materiály nevyhovují svou korozní odolností (oceli), mechanickými vlastnostmi (olovo, nekovové materiály) nebo extrémně vysokou cenou (titan, tantal).

Pro redukční působení prostředí byly vyvinuty slitiny Ni-Mo-Fe jako Hastelloy A a zlepšený typ Hastelloy B. Využívají se například na nádrže pro moření v HCl nebo v  $H_2SO_4$ . Pro oxidační prostředí se využívají slitiny na bázi Ni-Mo-Cr označovány jako Hastelloy C a Ni-Si-Cu označovány jako Hastelloy D, které odolávají kyselině sírové v celém rozsahu koncentrací a teplot až do bodu varu.

### 1.3.3 Žárupevné a žáruvzdorné slitiny

Žárupevné a žáruvzdorné slitiny jsou vysokopevné konstrukční materiály, které se používají tam, kde nepostačují svými vlastnostmi žárupevné oceli a jsou určené pro teploty nad  $750^{\circ}C$ . Vývoj byl motivovaný především vývojem spalovacích turbín a potřebou pracovat s vyššími teplotami spalin. Jejich představitelem je slitina Nimonic, která se stala výchozím materiálem pro další vývoj. Komplexně legované vytvrditelné slitiny niklu se používají pro nejvyšší tepelně pevnostní podmínky, které se díky svým vlastnostem označují jako superslitiny.

Slitiny Ni-Cr mají jako hlavní prvek nikl (35-70%) a významný podíl chromu (až 30 %). Jsou známy pod označením Nimonic, Inconel, Udiment, Hastelloy a jde o komplexní slitiny na bázi Ni-Cr s přísadou precipitačně zpevňujících prvků (Ti, Al) a dalších prvků jako W, Mo, Co, Nb, Ta, Zr. Precipitátem je intermetalická uspořádaná sloučenina  $Ni_3(Ti, Al)$  označovaná  $\gamma'$ , která je koherentní s maticí  $\gamma$ . Dalšími vyztužujícími fázemi jsou karbidy a karbonitridy. Kombinace niklu a chromu poskytuje mimořádnou odolnost vůči oxidaci a ke zvýšení korozní odolnosti se dosahuje přidáním molybdenu. Používají se převážně na nejnamáhanější součásti parních a spalovacích turbín.

## 1.4 Chemické složení

Vlastnosti niklových superslitin přímo závisí na chemickém složení, které nám určuje možnou pevnost materiálu, jeho korozní odolnost i žárupevnost a žáruvzdornost. K dosažení přesně požadovaných parametrů materiálu ovšem nestačí pouze kontrolovat obsahy jednotlivých prvků, ale rozhodující je tepelné zpracování. To je odlišné pro tvářené a odlévané výrobky. [5]

Niklové superslitiny jsou tvořeny hlavně niklem v kombinaci s dalšími prvky. Nejčastěji to je chrom, kobalt, hliník a další přísadové prvky, jako je wolfram, niob či molybden. Kromě těchto prvků se v niklových superslitinách vyskytují i doprovodné příměsi a nečistoty, které jsou nežádoucí. [5]

### 1.4.1 Vliv jednotlivých prvků v niklových slitinách [4]

Jednotlivé prvky chemického složení mají různé účinky na mechanické vlastnosti slitiny. Některé vstupují do matrice a zajišťují zde např. zvýšení pevnosti (těžké prvky s velkým průměrem atomu Mo, Ta, W, Re, Nb), oxidační rezistenci (Cr a Al), žáruvzdornost (Ti), fázovou stabilitu (Ni). Další funkcí přísadových prvků je tvorba vytvrzujících precipitátů  $\gamma'$  (Al a Ti) a  $\gamma''$  (Nb). U niklových superslitin se někdy z úsporných důvodů nahrazuje Ni železem, ale u žárovevých slitin je považováno železo za nečistotu a jeho obsah je snížen pouze na několik desetin procenta.

Prvky v niklových slitinách můžeme rozdělit do dvou skupin:

1. prvky, které působí na zpevnění matrice Al, Ni, Nb, Mo, W, V, Fe a Co
2. prvky, které působí na zpevnění hranice zrn B, Zr, C, Cr, W, Mo, V

V žárupevných slitinách se nacházejí i prvky, které oslabují hranice a tím snižují pevnost slitiny (Pb, Bi, Se, S) a nacházejí se zde také prvky, které zlepšují obrobiteľnosť, zvyšujú odolnosť proti oxidácii apod. (Ca, Mg, Y).

**Kobalt a železo** tvoří s niklem substituční tuhý roztok, základní kovovou matici. Fe a Co se přidávají místo Ni. Se vzrůstem obsahu Fe klesá odolnost materiálu vůči vysokoteplotní korozi a roste náchylnost na tvorbu nežádoucí fáze. Kobalt snižuje rozpustnost Al a Ti v matrici, čímž způsobuje zvýšení pevnosti při vysokých teplotách. Co dále zvyšuje teplotu rekrystalizace a teplotu rozpustnosti precipitátů, čímž způsobuje vznik komplexních karbidů a dochází ke zlepšení obrobiteľnosti materiálu.

**Chrom** má v žárupevných slitinách dvojí účinek. Zvyšuje odolnost vůči vysokoteplotní korozi a zúčastňuje se tvorby komplexních karbidů, které zpevňují matici hlavně v oblasti rozhraní zrn. Minimální obsah Cr, který zaručuje korozní odolnost, je 13 hmotnostních procent.

**Hliník, titan, niob** - Titan a hliník tvoří s niklem intermetalické precipitáty  $Ni_3(Al, Ti)$ . Množství fáze v Ni slitinách vzrůstá s obsahem Al+Ti. Ti, Al se mohou nahradit Nb. Pokud je obsah Nb vyšší než 4%, dochází k vytvoření samostatné zpevňující fáze  $Ni_3Nb$ . Al zlepšuje korozní odolnost tím, že vytváří ochrannou vrstvu  $Al_2O_3$ . Zda se bude vytvářet  $Al_2O_3$  nebo  $Cr_2O_3$  závisí od poměru obsahu obou prvků ve slitině. Ti a Nb také mohou vytvářet karbidy.

**Molybden, wolfram, tantal** - tyto prvky způsobují substituční vytvrzování. V určitém rozsahu se rozpouštějí a mění parametry pevnostních charakteristik. Spolu s uhlíkem vytvářejí



různé typy karbidů, které zvyšují zpevnění materiálu při vysokých teplotách. Zvýšení obsahu W a Ta způsobuje zvýšení měrné hmotnosti slitiny, což je nežádoucí pro součásti, které jsou namáhány odstředivou silou při vysokých teplotách. Tyto prvky zpomalují difuzi a brání tak růstu a koagulaci vytvrzující fáze.

**Bór, zirkon** jsou prvky, které jsou přidávány pro zlepšení creepové pevnosti a tažnosti. Přednostně segregují na hranicích zrn. Zr se zúčastňuje tvorby vytvrzující fáze, B zpomaluje difuzi legujících prvků a tedy i rozpad tuhého roztoku. Tyto prvky vytlačují uhlík směrem do základní hmoty zrn. Zr, B nepříznivě působí na tvařitelnost materiálu.

**Uhlík** se přidává jen v omezeném množství na zlepšení creepové pevnosti, která je spojená s tvorbou karbidů.

Tab. 1.2 Rozmezí legujících prvků v superslitinách niklu

Prvky	Obsah [hm %]	Prvky	Obsah [hm %]
Fe	0 - 35	Mo	0 - 10
Co	0 - 15	W	0 - 10
Cr	5 - 25	Ta	0 - 8
Al	0 - 7	B	0,005 - 0,06
Ti	0 - 5	Zr	0 - 0,1
Nb	0 - 6	C	0,02 - 0,25

Tab. 1.3 Vliv přísadových prvků na superslitiny niklu

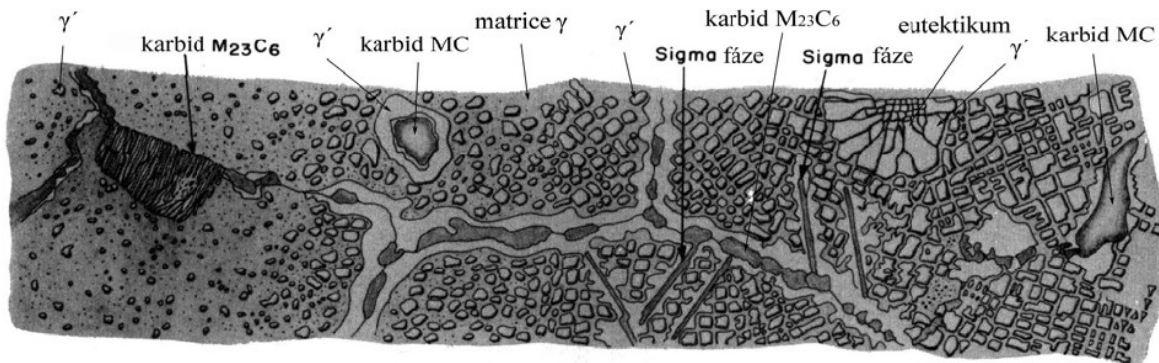
Tvorba strukturních součástí		Prvky
Substituční zpevnění matrice		Co, Cr, Mo, Fe, W, Ta
Tvorba koherentních precipitátů		Al, Ti, Nb
Tvorba karbidů	MC	W, Ta, Ti, Mo, Nb
	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr
	M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr, Mo, W
	M <sub>6</sub> C	Mo, W
Tvorba karbonitridů M(CN)		Ti, Zr, Nb, Hf
Tvorba nežádoucích fází (TCP)		Cr, Mo, W, Fe, Nb, Ni, Co
Vlastnosti		Prvky
Korozní odolnost		Al, Cr, Ta
Zlepšení vysokoteplotní korozní odolnosti		La, Th
Zpevnění hranic zrn		B, Zr, Hf
Odolnost proti sulfidům		Cr

## 1.5 Mikrostruktura niklových slitin

Niklové superslitiny mají mikrostrukturu tvořenou matricí  $\gamma$  (tuhý roztok Ni, Cr, Co, Mo a dalších). S touto fází jsou koherentně spojeny částice vytvrzující fáze  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$  nebo  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ), někdy i částice  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ), které se vyskytují hlavně u superslitin. Vylučují se také primární karbidy (MC), sekundární karbidy ( $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{M}_6\text{C}$ ,  $\text{M}_7\text{C}_3$ ) nebo boridy a karbonitridy ( $\text{M}_3\text{B}_2$ ,  $\text{M}(\text{C}, \text{N})$ ,  $\text{M}_{23}(\text{C}, \text{N})_6$ ). [6]

Pro získání co nejlepších vlastností materiálu je velice důležitá eliminace vylučování nežádoucích fází ( $\eta$ ,  $\mu$ ,  $\zeta$  a Lavesova), které se mohou po dlouhodobém provozu za vysokých teplot vylučovat ve struktuře. Pokud se objeví v dostatečně velikém množství, způsobují především zkřehnutí materiálu. Proto je nutné pečlivě sledovat chemické složení a provozní podmínky k zamezení jejich vzniku. [6]

Obrázek 1.2 zobrazuje historický vývoj mikrostruktury niklové superslitiny, který se dělí na 4 etapy. Můžeme zde vidět, jak se postupně měnilo množství a tvar (od kulovitého po kubický) fáze  $\gamma'$ . Dále obrázek zobrazuje příklady žádoucích (matrice  $\gamma$ , fáze  $\gamma'$ , karbidy MC,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ) i nežádoucích fází (eutektikum,  $\sigma$  fáze). V tabulce 1.4 je možné vidět přehled jednotlivých fází, které se vyskytují v superslitinách. [6]



Obr. 1.2 Historický vývoj mikrostruktury niklových superslitin [6]

Tab. 1.4 Přehled fází vyskytujících se v superslitinách [6, 7]

Fáze	Mřížka	Vzorec	Popis
<b>Základní fáze</b>			
$\gamma$	FCC	Ni	Substituční tuhý roztok, matrice.
$\gamma'$	FCC	Ni <sub>3</sub> Al, Ni <sub>3</sub> (Al, Ti)	Základní zpevňující fáze v mnoha niklových superslitinách. Tvar se mění od kulového ke kubickému. Velikost se mění s teplotou a dobou namáhání.
$\gamma''$	BCT	Ni <sub>3</sub> Nb	Základní zpevňující fáze ve speciálních slitinách (např. Inconel 718). Metastabilní fáze, precipituje jako koherentní diskovité částice.
<b>Karbidy</b>			
MC	SCC	TiC, Nb, C, HfC	Složení je různé, tvoří nepravidelné globule. Muže být Ti, Ta, Nb, Hf, Th nebo Zr.
M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	FCC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Fe <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , W <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Mo <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Může být ve tvaru globulí, desek aj., obvykle se vyskytuje na hranicích zrna.
M <sub>6</sub> C	FCC	Fe <sub>3</sub> Mo <sub>3</sub> C, Fe <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C, Fe <sub>4</sub> W <sub>2</sub> C, Fe <sub>3</sub> Nb <sub>3</sub> C, Nb <sub>3</sub> Co <sub>3</sub> C, Ta <sub>3</sub> Co <sub>3</sub> C	Náhodně distribuované karbidy.
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	HCP	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Vyskytují se pouze v některých slitinách po vystavení teplot nad 1000°C. Nejčastěji tvoří deskovité částice na hranicích zrn.
<b>Nitridy a boridy</b>			
M <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	SCT	Ta <sub>3</sub> B <sub>2</sub> , V <sub>3</sub> B <sub>2</sub> , Cr <sub>3</sub> B <sub>2</sub> , Fe <sub>3</sub> B <sub>2</sub> , Mo <sub>3</sub> FeB <sub>2</sub> , Nb <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	Vyskytují se v niklových slitinách s obsahem bóru nad 0,03. Vypadají obdobně jako karbidy.
MN	SCC	TiN, ZrN, NbN	Nitridy se vyskytují ve slitinách obsahujících Ti, Ni a Zr. Jsou nerozpustné pod teplotou tavení. Mají kruhové nebo obdélníkové tvary.
<b>Nežádoucí fáze</b>			
$\mu$	Romboedrická	Co <sub>7</sub> W <sub>6</sub> , Fe <sub>7</sub> Cr <sub>6</sub> , Ni <sub>7</sub> Mo <sub>6</sub> , Co <sub>7</sub> Mo <sub>6</sub>	Vyskytují se ve slitinách s vysokým obsahem Mo a W. Tvoří se za vysokých teplot jako hrubozrnná Widmanstättenova struktura.
Lavesovy fáze	HCP	Fe <sub>2</sub> Nb, Fe <sub>2</sub> Ti, Fe <sub>2</sub> Mo, Ni <sub>2</sub> Nb	Často se vyskytují v supeslitinách Co. Nejčastěji vypadají jako nepravidelné protažené globule.
	FCC	Co <sub>2</sub> Ta, Co <sub>2</sub> Ti	
$\sigma$	BCT	(CrMo) <sub>x</sub> (NiCo) <sub>y</sub>	Vyskytují se častěji ve slitinách na bázi Co. Nejčastěji vypadají jako nepravidelné protažené globule.
$\eta$	HCP	Ni <sub>3</sub> Ti	Vyskytuje se ve slitinách s vysokým obsahem Al a Ti po dlouhodobém namáhání. Tvoří kulaté útvary na hranicích zrn nebo jehlice uvnitř zrn ve Widmanstättenové struktuře

### 1.5.1 Fáze $\gamma$ - matrice

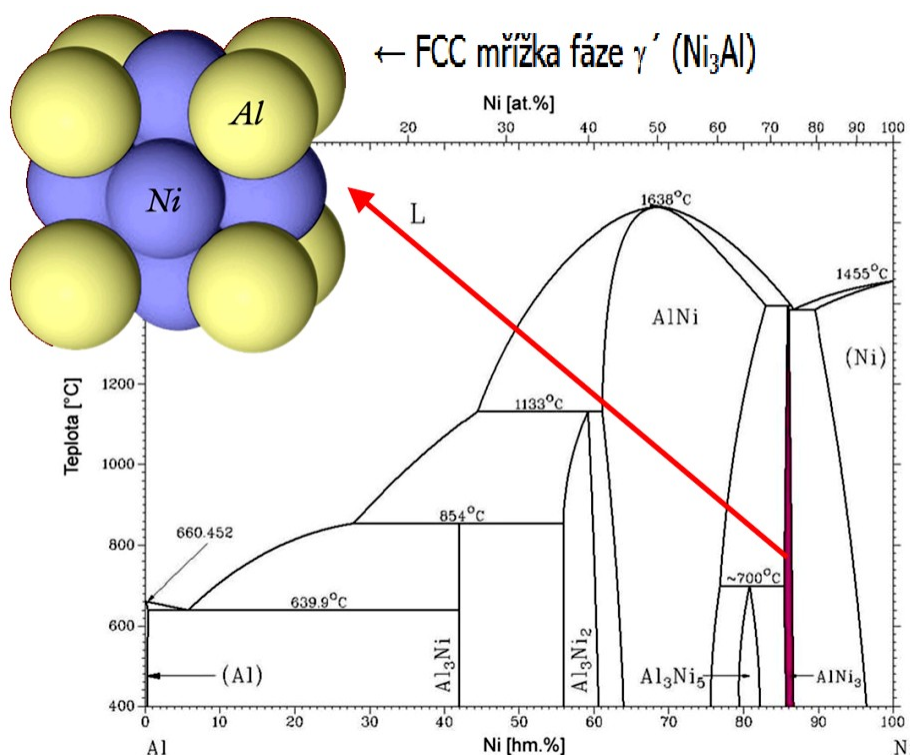
Fáze  $\gamma$  je u niklových superslitin základní strukturní složkou. Je to substituční tuhý roztok Ni a legujících prvků. Má kubickou plošně středěnou mřížku (FCC). Nejčastěji se leguje prvky Co, Fe, Cr, Mo a W. Legující prvky se volí podle velikostního faktoru a počtu valenčních elektronů s ohledem na strukturní stabilitu za vysokých teplot. [8]

### 1.5.2 Vytvrzující fáze $\gamma'$

Nejdůležitější strukturní součástí v niklových superslitinách je zpevňující fáze  $\gamma'$ . Je to intermetalická fáze  $\text{Ni}_3\text{Al}$  nebo  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ . Právě tato fáze zajišťuje mimořádné vlastnosti superslitin niklu za zvýšených teplot. Vzniká z neuspořádaného tuhého roztoku  $\gamma$  při ochlazování. Při úzkém rozmezí chemického složení s klesající teplotou vstupují atomy do mřížky a roztok se mění na uspořádaný. V mřížce fáze  $\gamma'$  zabírají uzlové body atomy Al a Ti zatímco Ni obsazuje středy stěn a tím vzniká uspořádaná FCC struktura typu  $\text{L1}_2$ . [8]

Fáze  $\gamma'$  může precipitovat ve tvaru globulí, krychlí nebo tyčinek. Tento tvar určuje deformační a povrchová energie. Výsledný tvar precipitátu je dán minimem v součtu obou energií. Velikost deformační energie se určuje mřížkovou neshodou (mismatch), orientací a velikostí precipitátu. Když je mřížková neshoda menší než 0,4 nabývá precipitát kulového tvaru. Pro mřížkovou neshodu v rozmezí  $0,4 \div 1$  má precipitát tvar kubický a při hodnotě větší než 1 vzniká tvar tyčinkový. Při nárůstu fáze  $\gamma'$  se může morfologie měnit z kulového tvaru na kubický. [8]

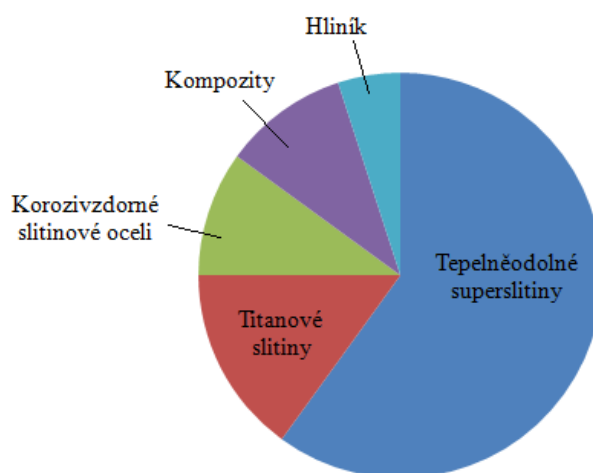
Vlastnosti výsledné slitiny přímo závisí na morfologii, objemovém podílu a stabilitě za vysokých teplot fáze  $\gamma'$ . První generace těchto slitin měly precipitáty s globulární morfologií a objemovým podílem kolem 20%. Současná generace obsahuje vhodnější kvádrový (kuboidální) tvar a objemový podíl kolem 70%. Zvyšování objemového podílu se provádí zvyšováním obsahu Al a Ti. Díky tomu roste i pevnost. Právě podíly kolem 70% jsou optimální pro dosažení maximální pevnosti. Posuzovat vlastnosti superslitiny však nelze jen podle množství zpevňující fáze. Aby tento podíl, byl efektivně využitý, je nutné zajistit srovnatelnou pevnost hranic zrn. Pokud tomu tak není, může docházet k předčasným lomům součástí z důvodů obtížné relaxace napětí. [8]

Obr. 1.3 Vytvrzující fáze  $\gamma'$  a matrice  $\gamma$  [9]Obr. 1.4 Binární rovnovážný diagram Al – Ni, a buňka intermetalické fáze  $\text{Ni}_3\text{Al}$  [9]

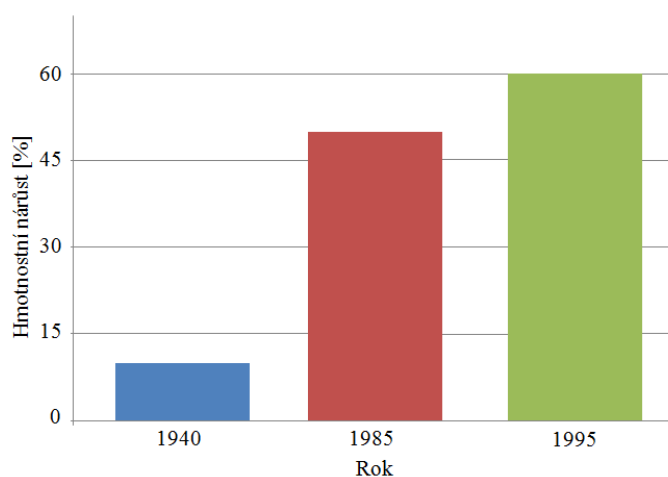
## 1.6 Použití superslitin

Nejdůležitějšími vlastnostmi superslitin je dlouhodobá pevnost při teplotách nad 750°C a odolnost proti korozi za vysokých teplot. Pro jejich vysokou tepelnou odolnost se nejvíce používají v leteckých motorech jako součásti proudových a raketových motorů a to jako lopatky turbín, hřídele atd. Ze stejných důvodů se tyto superslitiny používají i v energetických generátorech, u extrémně namáhaných spalovacích motorů i ve speciální technice. Materiálová skladba se v leteckých motorech mění s vývojem nových materiálů a všeobecně

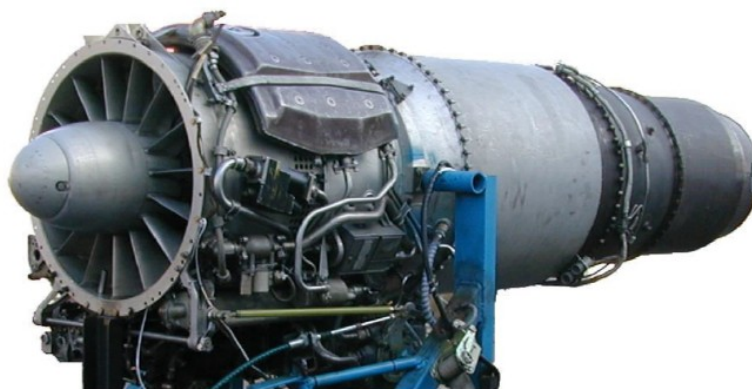
vyžaduje vysokou pevnost, tepelnou a korozní odolnost. Dominantní materiálovou skupinou jsou tepelně odolné superslitiny, které se svým použitím podílejí přibližně (55-65)% na celkové hmotnosti motoru. [4]



Obr. 1.5 Materiálová skladba leteckého motoru [4]



Obr. 1.6 Hmotnostní nárůst superslitin v leteckém motoru [4]



Obr. 1.7 Použití jako součásti raketových a proudových motorů [9]

## 2. Technologie obrábění

Obrábění kovů je technologický proces, při kterém se odebíráním materiálu vytváří požadovaný tvar obráběného předmětu (obrobku). Při obrábění kovů je řezná hrana velkou silou vtlačována do materiálu obrobku, který je deformován tak silně, až dojde k oddělení ve formě třísky. Výsledkem je opracovaný povrch, který musí splňovat dané požadavky. [10]

Při obrábění korozivzdorných a žárupevných ocelí, hovoříme o materiálech, které se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Tyto materiály se vyznačují specifickými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které jsou využívány především v leteckém, těžebním a přímořském průmyslu. [5]

Obrábění materiálů patřících do tzv. superslitin, tedy i niklových slitin, je velmi problematické a pro každou jednotlivou operaci obrábění specifické jak z hlediska použitých řezných podmínek, tak i z hlediska řezného nástroje a požadavků na obráběcí stroj. [5]

### 2.1 Obrobitelnost

Pojem obrobitelnost materiálu znamená souhrn fyzikálně - mechanických vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součásti určitým způsobem obrábění. Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a hlavním faktorem, který ovlivňuje volbu řezných podmínek. [10]

Obrobitelnost závisí na mnoha faktorech, z nich nejdůležitější je způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu, mikrostruktura, chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, metoda obrábění, pracovní prostředí, geometrie nástroje, druh a vlastnosti nástrojového materiálu. [10]

Podle charakteristiky se obrobitelnost rozděluje na obrobitelnost absolutní a relativní.

**Absolutní obrobitelnost** vyžaduje určit závislosti (vzorce) potřebné pro výpočet řezných sil, trvanlivost nástroje a drsnosti povrchu od parametrů řezání, tak i informace o tvaru třísky.

**Relativní obrobitelnost** je určována bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikostí určité veličiny, a sice poměr velikosti veličiny vztahující se k danému zkoumanému materiálu a velikost veličiny odpovídající etalonovému (referenčnímu) materiálu. [5, 10]

Obrobitelnost je ovlivněna pěti základními vlastnostmi materiálu: tažností, deformačním zpevněním, tepelnou vodivostí, tvrdostí a abrazivností. Pokud porovnáme niklové superslitiny s běžně používanými oceli, zjistíme zajímavé rozdíly. [11]

**Tažnost**

Niklové superslitiny vykazují vyšší tažnost než běžné oceli. Řezné materiály musí být tedy houževnatější a povlakované vrstvou s nižší tendencí k adhezi. Mikrogeometrie řezné hrany musí kompenzovat vysokou tažnost a musí dobře utvářet třísky. Zvláštní pozornost je třeba věnovat drobnému vylamování řezné hrany (z důvodu tvorby nárůstků), vrubovému opotřebení a odlupování povlaku. [11]

**Deformační zpevnění**

Niklové superslitiny mají vyšší sklony k deformačnímu zpevnění. U řezné hrany by měla být použita ostřejší hrana, která snižuje deformační zpevnění během řezného procesu. Hloubku řezu je nutné neustále měnit, aby bylo rozloženo riziko vzniku výrazného vrubového opotřebení na ostří během obrábění v deformačně zpevněné vrstvě. Větší vrubové opotřebení a drobné vylamování řezné hrany jsou přirozeným důsledkem této vlastnosti materiálu. [11]

**Tepelná vodivost**

Tepelná vodivost je u niklových superslitin nižší, proto je třískami odváděno méně tepla, proto je více tepla přenášeno do řezné hrany, což vede k vyšším teplotám na řezné hraně. U použitých řezných materiálů je velmi důležitou vlastností vysoká tvrdost za vysokých teplot. Řezné rychlosti by měli být zvoleny tak, aby co nejvíce tepla bylo odváděno třískou. Plastická deformace je typickým opotřebením nástroje. [11]

**Tvrdost**

Tvrdost je srovnatelná s ocelí. Řezné síly jsou podobné jako u ocelí a nejsou nutná jakákoliv zvláštní opatření pro kompenzaci řezných sil. V případě zvolení správných řezných podmínek by hlavním druhem opotřebení měl být otěr na hřbetu. [11]

**Abrazivost**

Niklové superslitiny jsou v porovnání s ocelemi více abrazivní, což klade zvláštní nároky na povlak. Povlaky musejí být vysoce otěruvzdorné a je důležité maximalizovat objem odebraného materiálu po dobu životnosti nástroje. Abrazivost způsobuje rychlý vznik výmolů. [11]

Obrobitelnost hodnotíme nejčastěji především z hlediska intenzity opotřebení bříty, dále též z hlediska teplotního, silového, technologického a kvalitativního. Obráběné materiály proto byly rozděleny do šesti hlavních skupin v souladu se standardy ISO, přičemž každá z těchto skupin má specifické vlastnosti z hlediska obrobitelnosti. [10]



**ISO systém [10, 12]**

- ISO-P materiály jsou materiály s tvorbou dlouhé třísky, které generují průměrné řezné síly, vytváření tepla (i řezné teploty) a průměrnou životnost nástroje.
- ISO-K materiály jsou materiály s krátkou třískou.
- ISO-M materiály (austenitické nerezové oceli) jsou odlišné od ISO-P především v tepelných vlastnostech (a jevech s tím spojených).
- ISO-N materiály jsou měkčí (nižší řezné síly), vykazují však vyšší přilnavost k řezným materiálům.
- ISO-S materiály vykazují výrazné rozdíly v tepelných vlastnostech oproti oceli.
- ISO-H materiály jsou velmi tvrdé a vyžadují vysoké řezné síly, pokud nejsou použity specifické metody obrábění (tzv. technologie tvrdého obrábění).



*Obr. 2.1 Dělení materiálů podle systému ISO [12]*

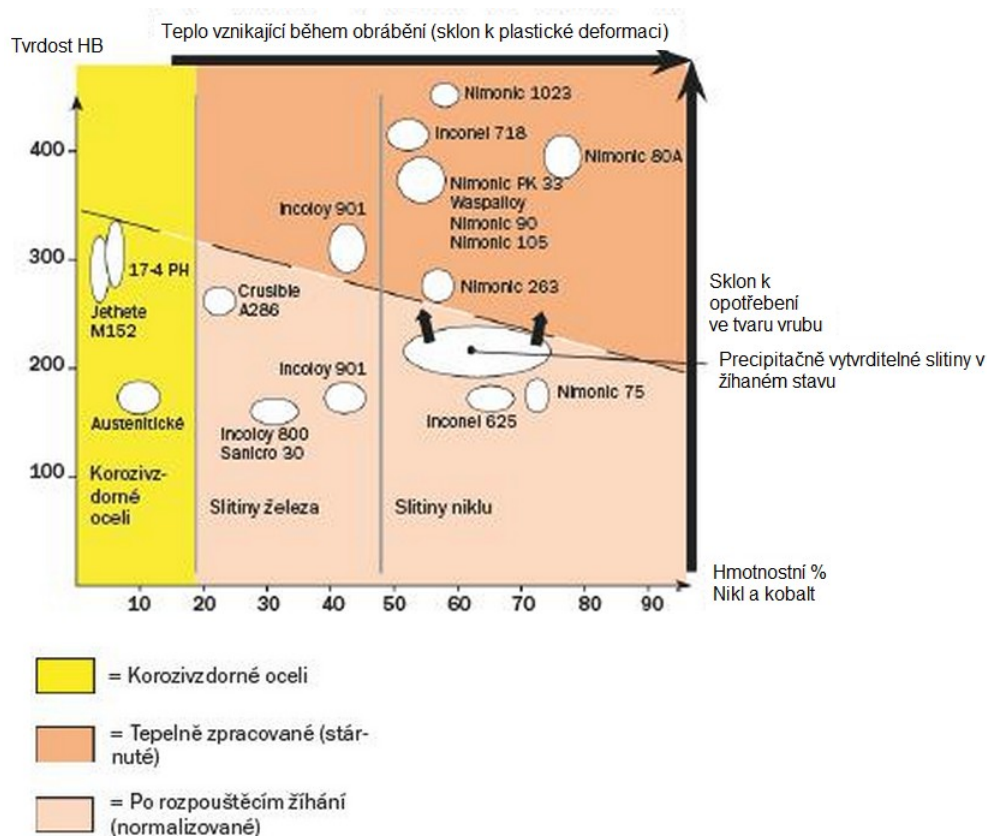
Niklové slitiny se řadí podle systému ISO do skupiny S.

**ISO S** – Žárovzdorné superslitiny zahrnující celou řadu vysokolegovaných ocelí a materiály na bázi niklu, kobaltu, a titanu. Tyto materiály snadno ulpívají na břítu a tvoří nárůstek. Během obrábění dochází k jejich zpevňování (mechanické zpevňování) a vzniká velké množství tepla. Jejich vlastnosti jsou velmi podobné jako u oblasti ISO M, ale jejich obrábění je ještě mnohem obtížnější a životnost břítu je kratší. [12]

Skupinu ISO S je možné rozdělit na žárovzdorné slitiny a titan.

Žárovzdorné slitiny lze dále rozdělit do tří skupin [13]:

- slitiny na bázi niklu,
- slitiny na bázi železa,
- slitiny na bázi kobaltu.



Obr. 2.2 Žáruvzdorné slitiny [13]

Niklové slitiny se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Příčinami jejich špatné obrobitelnosti může být udržení si své vysoké pevnosti v průběhu obrábění, kdy je v zóně řezání vysoká teplota (špatná tepelná vodivost), při které se vyskytují chemické reakce způsobující difuzní opotřebení nástroje, a tepelně zatěžuje břit nástroje, dále také v průběhu obrábění dochází ke zpevňování materiálu, což přispívá ke vzniku žlábků na řezné hraně, v místě kde končí kontakt mezi nástrojem a obrobkem. Pro niklové slitiny je charakteristické vytváření nárůstku na břitu nástroje, což vede k vytváření žlábků na čele. V niklových slitinách je velké množství tvrdých karbidů a nástroj je vystavený velkému abrazivnímu účinku. Při obrábění vzniká zpevněná třísky, která se špatně deformuje a vytváří tak kráter v místě kontaktu třísky s nástrojem. [5, 14]

Z důvodů špatné obrobitelnosti je zapotřebí při obrábění niklových slitin dodržet některé zásady [5, 14]:

- tuhost soustavy stroj - nástroj - obrobek musí být co největší, aby byly eliminovány vynucené a samobuzené kmity při obrábění,
- nevolit velmi malé hodnoty posuvu a hloubek řezu, díky kterým by nastalo nebezpečí zpevňování,

- volit menší přípustnou hodnotu opotřebení nástroje v porovnání s běžnými uhlíkovými ocelemi,
- musí být zajištěn stálý a pravidelný záběr,
- nástroj kvalitně naostřit a správně nastavit vůči obrobku,
- při práci používat řeznou kapalinu.

## **2.2 Soustružení Ni superslitin**

Soustružení těžkoobrobitelných materiálů činí nejméně potíží ze všech operací. Pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů mohou být použity nástroje z rychlořezné oceli, ze slinutých karbidů a z nekovových materiálů jako řezná keramika a kubický nitrid boru.

### **2.2.1 Volba řezného nástroje**

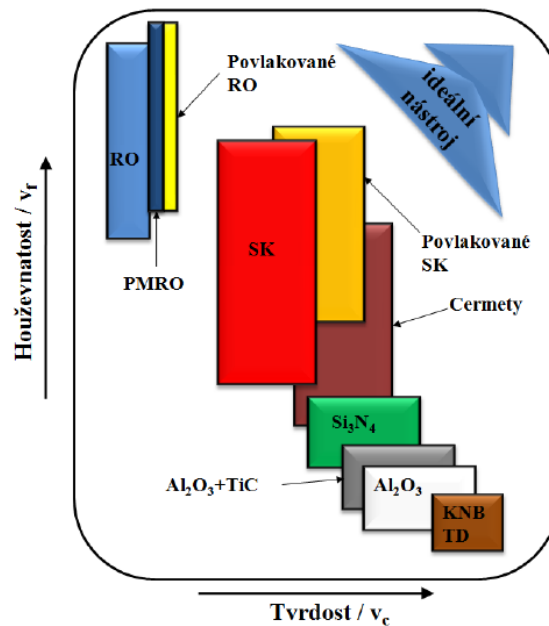
Při obrábění niklových slitin je namáhání řezného klínu značně vysoké. Požadavky kladené na nástrojový materiál pro obrábění niklových slitin [5]:

- vysoká pevnost a houževnatost,
- dobrá odolnost proti opotřebení,
- vysoká pevnost při vysokých teplotách,
- odolnost proti teplotním rázům,
- dostatečná chemická stabilita při zvýšených teplotách.

Při obrábění superslitin niklu je velký problém deformační zpevnění, které se uskutečňuje při odřezání vrstvy materiálu ve tvaru třísky po jeho předchozí plastické deformaci v oblasti řezání a tření na čelní a hřbetové ploše. Projevem těchto plastických deformací je zpevnění povrchové vrstvy deformovaného materiálu. [5]

Snížení, resp. vyhnutí se samovytvrzení materiálu při dokončovacím obrábění, které je obzvláště důležité při výrobě superslitin jsou [5]:

1. Použití řezných materiálů s pozitivní geometrií - kladné úhly čela, které řezou materiál, místo aby ho tlačili,
2. Vyhnutí se příliš malým hodnotám posuvů a hloubkám řezu,
3. Nepřipustit příliš velké opotřebení řezného klínu nástroje, aby se netřel o obrobek.

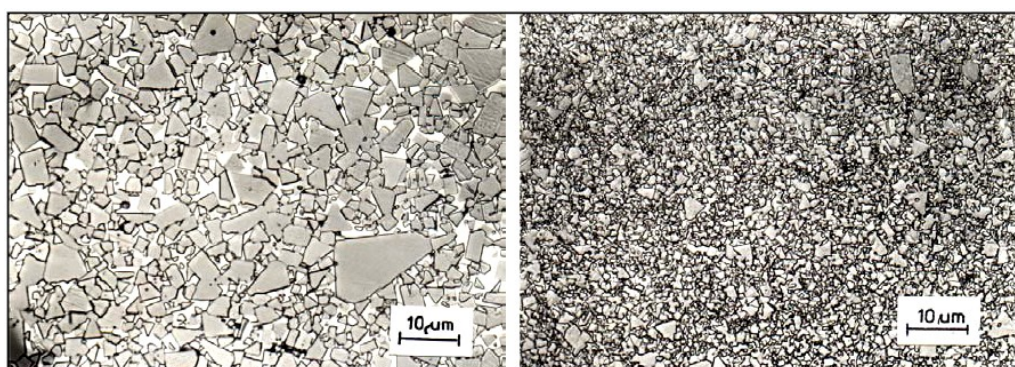


Obr. 2.3 Přehled nástrojových materiálů dle ČSN ISO 513 [15]

### Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou materiály vyráběné práškovou metalurgií. Jsou směsí částic karbidu wolframu (WC) a kovového pojiva bohatého na kobalt (Co). Slinuté karbidy používané pro obráběcí operace obsahují více než 80% částic tvrdé fáze WC. Další důležitou součástí jsou příměsi kubického karbonitridu titanu, zvláště u gradientně slinovaných tříd. [15, 16]

Velikost zrna WC je jedním z nejdůležitějších parametrů, které mají vliv na tvrdost nebo houževnatost dané třídy. Množství a složení pojiva obohaceného Co určuje houževnatost a odolnost dané třídy proti plastické deformaci. Při stejné velikosti zrn WC se rostoucí množství pojiva projeví zvýšením houževnatosti dané třídy, která je zároveň náchylnější k plastické deformaci. Příliš nízký obsah pojiva se může projevit křehkostí daného materiálu. Kubické karbonitridy, často nazývané jako  $\gamma$  fáze, jsou obvykle přidávány za účelem zvýšení tvrdosti za vysokých teplot. [15, 16]



Obr. 2.4 Hrubozrnná a jemnozrnná struktura [16]

Slinuté karbidy umožňují obrábět niklové slitiny stejnými řeznými rychlostmi jako většinu těžkoobrobitelných materiálů a jsou doporučeny pro většinu soustružnických operací, zejména pro nepřerušované řezy. Pro volbu optimálního druhu SK materiálu je rozhodující charakter namáhání řezného klínu nástroje. Řezný klín nástroje je při obrábění namáhán mechanicky (na ohyb nebo rázy) a třením. [5]

### **Řezná keramika**

Keramika je obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Výchozí surovinou jsou čisté a jemnozrnné prášky základních surovin, které se mísí, tvarují, suší, slinují (nad 1600°C) a nakonec upravují do požadovaného tvaru. Keramické břitové destičky neobsahují žádnou pojící fázi, to vyžaduje přesné dodržování technologického postupu výroby s ohledem na druh lisování, přípravu výchozích prášků, volbu velikosti zrn a přísad. [17, 18]

Pro obrábění niklových slitin se doporučuje použít vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky vyztužené whiskery. Ze zvýšeného deformačního odporu niklových slitin a z vysoké pevnosti a houževnatosti, které si tyto žárupevné materiály udržují i při vysokých teplotách, vyplývá zvýšení složek řezné síly při soustružení. Tepelné namáhání řezného klínu je závislé na schopnosti obráběného materiálu pohlcovat teplo, které se vytvoří v zóně řezání. Niklové slitiny mají malou tepelnou vodivost, teplo vygenerované v zóně řezání se špatně odvádí třískou, a proto se koncentruje v zóně řezání. Následkem intenzivního opotřebení a vysokého napětí v nástroji při obrábění niklových slitin mají za následek vysoké přírůstky teploty v nástroji, které se sčítají s napětími vyvolanými mechanickým zatížením. Opotřebení nástroje při obrábění niklových slitin je charakteristické vytvářením drážky na hřbetu nástroje v místě, kde nástroj vychází ze záběru. Následkem vytvoření drážky velmi často dochází k postupnému vylamování nebo náhlému lomu řezného klínu. [5, 14]

### **Polykrystalický kubický nitrid boru**

Kubický nitrid boru se v přírodě nevyskytuje, a je proto vyráběn jen syntetickou cestou. Výchozím materiálem je hexagonální nitrid boru, který se vyskytuje v přírodě a jeho krystalická forma je obdobná grafitu. Krystalická mřížka kubického nitridu boru je podobná krystalické mřížce diamantu, ale chemicky je naprosto odlišná. Má mikrotvrdost blízkou téměř tvrdosti přírodního diamantu, přitom má podstatně větší schopnost odolávat vysokým teplotám v oblasti řezání, až do 1500 °C. Vlivem toho se dostává těchto oblastí

obrábění, které nejsou dostupné pro syntetický diamant. Je chemicky netečný k obráběnému materiálu, zejména k železu a jeho slitinám, a má velkou pevnost v tlaku. [18]

Kubický nitrid boru se používá pro obrábění (soustružení, vyvrtávání a frézování) kalených ocelí tvrdosti 55 až 67 HRC při hloubce řezu až 4 mm, posuvem 0,5 mm a řeznou rychlostí až  $260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Používají se do jednobřitých i několikabřitých nástrojů. Polykrystaly KNB se připájí do ocelové nebo mosazné vložky, která se mechanicky upíná do nožových držáků nebo vyvrtávacích tyčí. Se zřetelem na jeho vlastnosti se nedoporučuje používat kubický nitrid boru pro obrábění oceli tvrdosti pod 45 HRC. Při obrábění tepelně nezpracovaných ocelí je užití nevhodné a nerentabilní. [18]

## 2.2.2 Geometrie nástrojů

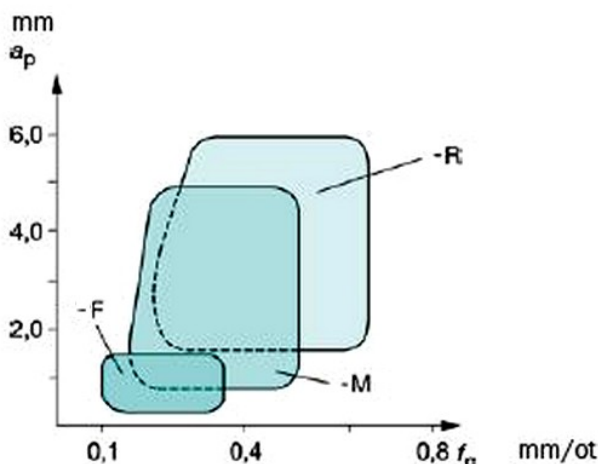
Při obrábění superslitin je velmi důležitá geometrie řezného nástroje. Důležitost vyplývá z velmi vysoké pevnosti, špatné tepelné vodivosti a sklonu k vytvrzování. Geometrie nástroje musí vyhovovat požadavkům na dostatečnou pevnost řezného klínu, na klidný průběh řezání bez chvění a na maximální trvanlivost nástroje při minimálním opotřebení. Při volbě optimální geometrie je potřebné zohlednit i technologické požadavky na přesnost a kvalitu obrobeného povrchu. [5, 14]

Všeobecné zásady pro geometrii řezných destiček ze slinutých karbidů [5]:

- pozitivní geometrie řezného klínu zabezpečující krátkou kontaktní plochu mezi třískou a řeznou destičkou a menší řezné síly, což má za následek nižší teplotu na řezné hraně,
- ostrá řezná hrana snižuje tendenci samovytvrzování,
- lamač třísky zabezpečuje dobrý a bezpečný odvod třísky, což má za následek snížení počtu přerušení během výrobního procesu.

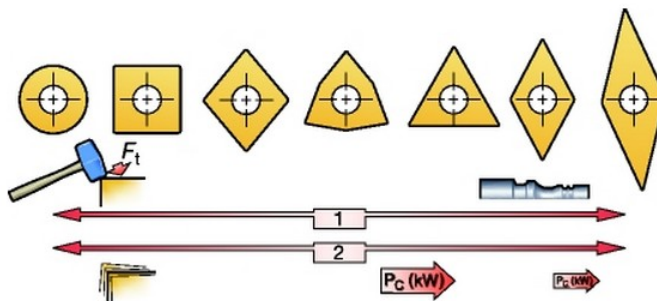
Geometrii nástrojů pro soustružení lze rozdělit do tří základních skupin optimalizovaných pro dokončování, střední obrábění a hrubování. Oblast použití lze pro každou geometrii graficky znázornit jako oblast vhodného utváření třísek při daném posuvu a hloubce řezu. [19]

- Hrubování – R je kombinací velké hloubky řezu a rychlosti posuvu. Operace vyžadující co nejvyšší bezpečnost hrotu.
- Střední obrábění – M je střední až lehké hrubování. Široká řada kombinací hloubky řezu a rychlosti posuvu.
- Dokončování – F je operace s malou hloubkou řezu a nízkými rychlostmi posuvu. Operace, které vyžadují nízké řezné síly.



Obr. 2.5 Závislost posuvu na hloubce řezu při volbě destičky [19]

Tvar destičky musí být vybrán s ohledem na přístupnost danou úhlem nastavení nástroje. Při volbě úhlu špičky je nutné volit největší možný úhel špičky, aby byla zajištěna pevnost destičky a spolehlivost. Musí být zachována určitá rovnováha vzhledem k rozmanitosti řezů, které mají být provedeny. Destička s větším úhlem špičky je pevnější, ale potřebuje větší výkon stroje a má větší sklony k vibracím. Destička s menším úhlem špičky není tak pevná a umožňuje menší hloubku záběru bříty, což může mít za následek zvýšenou citlivost k účinkům tepla. [20]



Obr. 2.6 Tvary destiček [20]

**Stupnice 1** představuje pevnost bříty. Čím větší je úhel špičky nalevo, tím je vyšší pevnost, pro vyšší univerzálnost a přístupnost jsou nejvhodnější destičky napravo. **Stupnice 2** Indikuje sklon k vibracím, který narůstá směrem doleva, zatímco požadavky na výkon klesají směrem doprava. [20]

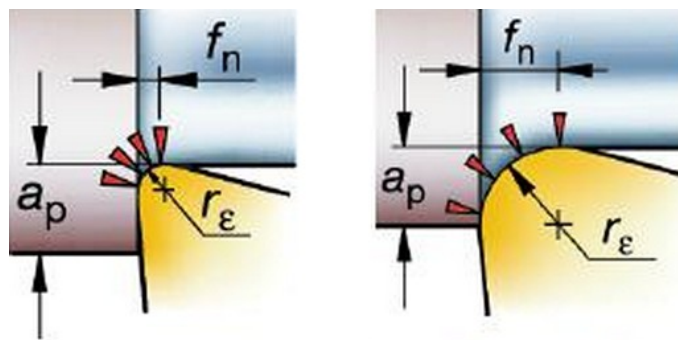
Je důležité udělat kompromis mezi tím jak pozitivní a jak ostrá může řezná destička být, aby vyhověla i po pevnostní stránce. Pro soustružení niklových slitin je doporučeno používat pozitivní geometrii nástrojů. Je důležité, aby nástroje měly kladný úhel čela, ten zajišťuje, aby byl materiál odříznut a ne přechován. Velikost úhlu hřbetu musí tvořit kompromis mezi dvěma stavy. Příliš malý úhel mezi břítem nástroje a obrobkem způsobí při



malém opotřebení stav, kdy se nástroj začne dotýkat hřbetem obrobku. Příliš velký úhel hřbetu zase způsobí oslabení břitu. [5, 14]

Podobné požadavky jsou kladeny i na úhel břitu. Tento úhel zpevňuje špičku rezného nástroje a zmenšuje účinek odporových sil působících na nástroj. Tloušťka třísky je do jisté míry závislá i na velikosti tohoto úhlu, protože úhel břitu ovlivňuje rozložení výkonu na ostří. To také, spolu s úhlem čela, poskytuje směrovou stabilitu nože při odchodu třísek. [5]

Poloměr špičky břitové destičky  $r_\epsilon$  je při soustružnických operacích klíčovým faktorem a je spojnicí vedlejšího a hlavního břitu, dává pevnost špičce nástroje a pomáhá rozptýlit teplo vytvářené řezáním. [21]



Obr. 2.7 Destička s malým a větším poloměrem špičky nože [21]

Výběr poloměru špičky závisí na hloubce řezu  $a_p$  a posuvu  $f_n$  a má vliv na jakost obrobené plochy, lámání třísek a pevnost břitové destičky. Malý poloměr špičky je ideální pro malé hloubky řezu, snižuje vibrace, ale snižuje také pevnost destičky. Větší poloměr špičky lze použít pro vysoké rychlosti posuvu, velké hloubky řezu, zajišťuje odolný břit a snese zvýšené radiální síly. Určitý poloměr břitu nástroje zajišťuje vroubkovaný efekt, který dává lepší jakost povrchu, mělčí stopy po nástroji a zmenší tvoření ostrých rohů na obrobku, než vroubkovaný povrch produkovaný ostrým nástrojem. [21]

U niklových slitin je možné dosáhnout výrazného prodloužení trvanlivosti řezné hrany povlakováním, avšak jen za předpokladu snížení mechanického zatížení například aplikací vhodného utvařeče třísek. [5]

### 2.2.3 Řezné rychlosti a posuvy

Vzhledem k mechanickým a fyzikálním vlastnostem niklových slitin není možné obrábět tyto slitiny stejnými řeznými podmínkami, které se používají pro obrábění běžných ocelí. Hlavní omezení se klade na řeznou rychlost a posuv [5]. Doporučené řezné rychlosti a posuvy jsou uváděny v katalozích výrobců řezných materiálů.



Na životnost nástroje mají vliv tři hlavní parametry obrábění, řezná rychlost, posuv a hloubka řezu. Nejmenší vliv má hloubka řezu, po ní následuje rychlost posuvu. Na životnost má největší vliv řezná rychlost. Pro dosažení co nejdelší životnosti nástroje se maximalizuje hloubka řezu, aby se snížil počet řezů, maximalizuje se posuv, pro zkrácení doby v řezu, řezná rychlost se naopak sníží pro co nejdelší životnost nástroje. [22, 23]

### Vliv hloubky řezu

Hloubka řezu musí být větší než rádius břitové destičky, což zajistí správné formování třísek, avšak nesmí být příliš velká (v porovnání s délkou řezné hrany), aby nedocházelo k vylomení břitu. Při zvolení příliš malé hloubky řezu se ztrácí kontrola utváření třísek, vznikají vibrace, nadměrný vývin tepla a nevhodný provoz. Pokud zase naopak je zvolena příliš velká hloubka řezu vzniká vysoká spotřeba energie, lom VBD a vyšší řezné síly. [22, 23]



Obr. 2.8 Vliv hloubky řezu [22]

### Vliv rychlosti posuvu

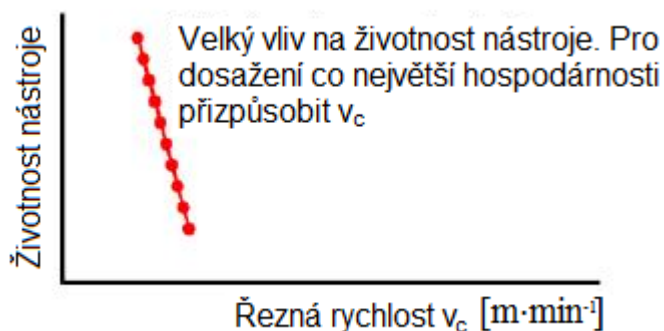
Posuv musí být dostatečný pro zajištění efektivního řezu, neměl by však být větší než polovina rádiusu břitové destičky, jinak by mohlo dojít k vylomení břitu. Pokud se zvolí příliš nízká hodnota posuvu, vzniká vláknitá tříska, rychlé opotřebení hřbetu, nárůstek na břitu a nevhodný provoz. Příliš vysoká hodnota posuvu způsobuje ztrátu kontroly utváření třísek, špatnou kvalitu obrobeneho povrchu, opotřebení ve tvaru žlábků (plastická deformace), vzniká vysoká spotřeba energie, navařování a zasekávání třísek. [22, 23]



Obr. 2.9 Vliv rychlosti posuvu [22]

### Vliv řezné rychlosti

Řezná rychlost musí být dostatečně velká, abychom se vyvarovali opotřebení typu nárůstku na hraně, při příliš vysoké řezné rychlosti ale může vzniknout opotřebení vlivem chemických jevů. Při zvolení příliš nízké řezné rychlosti vzniká nárůstek na břitě, otupení břitě, nevhodný provoz a špatná kvalita obroběného povrchu. U příliš vysoké řezné rychlosti vzniká rychlé opotřebení hřbetu, špatná kvalita obroběného povrchu, zvýšené opotřebení ve tvaru žlábků a plastická deformace. [22, 23]



Obr. 2.10 Vliv řezné rychlosti [22]

Tab. 2.1 Doporučené řezné podmínky pro soustružení niklových slitin [14]

Řezný materiál	Slinutý karbid							
Tvrdost obráběného materiálu	65 HRB	100 HRB	75 HRB	30 HRC	80 HRB	35 HRC	85 HRB	45 HRC
Hloubka řezu [mm]	6,4	1,3	6,4	1,3	6,4	1,3	6,4	1,3
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	85 ÷ 100	110 ÷ 120	55 ÷ 70	115 ÷ 225	60 ÷ 75	75 ÷ 90	12 ÷ 18	15 ÷ 30
Posuv na otáčku [mm]	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2

### 2.2.4 Procesní kapaliny

Při všech soustružnických operacích prováděných karbidovými nástroji by měly být použity procesní kapaliny buď na bázi olejových emulzí, nebo na chemické bázi, které následně dovolují použití vyšších řezných rychlostí, prodloužení trvanlivosti a životnosti řezného nástroje a vytvoření lepšího opracování povrchu. Každý obrobek obráběný nástroji z rychlořezných ocelí může být kvalitněji obroběn, pokud se jako procesní kapalina použije sirný a chlоровaný olej. Může být také použita olejová mlha, pokud je možné zajistit utěsnění pracovního prostoru od okolí [5]. Řeznou kapalinu je velmi důležité, používat ve vydatném množství průběžně a těsně u řezné hrany v místě řezu, aby se projevil všechny výhody, které poskytuje a aby se předešlo tepelnému šoku řezného nástroje v případě přerušení práce.

### 3. Opotřebení řezného nástroje

Opotřebení nástroje se projevuje kombinací mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů, kdy dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroje a obrobku, nástroje a třísky a dochází k opotřebení. Dalším kontaktem nástroje s obrobkem a odcházející třískou je nástroj namáhán na hlavním a vedlejším hřbetu, čele a špičce. [24]

Celý proces opotřebení břitu nástroje je složitý děj závisel na fyzikálních a mechanických vlastnostech nástroje a obrobku, na druhu operace, použité geometrii nástroje, pracovních a řezných podmínkách atd. [24]

#### Druhy opotřebení břitů nástrojů [25]:

- **Mechanické opotřebení**

Kromě statického zatížení je celá řada různých dynamických zatížení, které se odvíjejí z procesu utváření třísky. Dále vznikají zatížení přerušovanými řezy a vlivem nestejných hloubek řezu.

- **Tepelné opotřebení**

Velké množství tepla vzniká při obrábění kovů. Vyvíjí se na ploše čela a hřbetu břitové destičky. Tepelné zatížení značně namáhá materiál nástroje.

- **Chemické opotřebení**

Působí při vysokém tlaku a teplotě, kdy kontinuálně vytváří čistý povrch, který má sklony k chemickým reakcím, popř. k difuzním procesům.

- **Abrazivní opotřebení**

Obráběné materiály obsahují tvrdé částice, které se svojí tvrdostí příliš neliší od materiálu břitu nástroje. Tyto částice vyvolávají abrazivní účinek.

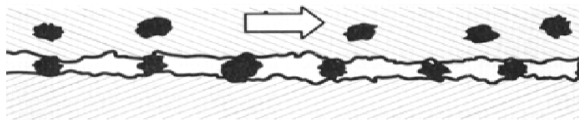
#### 3.1 Základní mechanismy opotřebení břitu

Kombinací uvedených mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje. Působením zatěžujících faktorů, které můžeme při obrábění pozorovat, vznikají základní mechanismy opotřebení [25]:

- abrazivní opotřebení,
- adhezní opotřebení,
- difusní opotřebení,
- oxidační opotřebení,
- plastická deformace,
- křehký lom.

### Abrazivní opotřebení

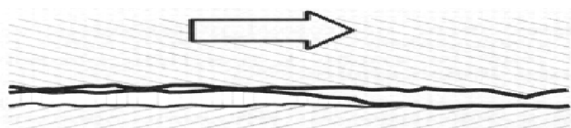
Je to velmi rozšířený druh opotřebení, který vzniká brusným otěrem tvrdých mikročástic, které se dostávají mezi povrch obrobku a nástroj. Schopnost břitů odolávat abrazivnímu opotřebení je nejvíce závislá na jeho tvrdosti. Řezný nástrojový materiál, který obsahuje hustou strukturu tvrdých částic, bude tomuto druhu opotřebení odolávat dobře. [25]



Obr. 3.1 Abrazivní opotřebení [25]

### Adhezní opotřebení

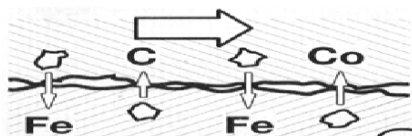
Adhezní opotřebení se vyskytuje na čele břitů nástroje a je to jev při kterém vznikají a následně okamžitě se porušují mikrosvarové spoje na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů. Takto nárůstkem vytvořený břit může tvořit základ pro nové nárůstky na břitu a může poškodit původní břit vydrolováním nebo výlomem. Je to velmi rozšířený typ žlábkového opotřebení. [25]



Obr. 3.2 Adhezní opotřebení [25]

### Difusní opotřebení

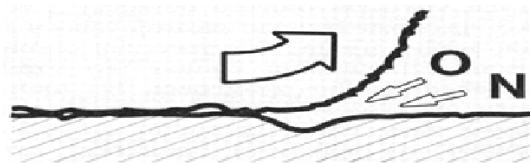
Vzniká působením chemických vlivů při procesu obrábění. Některé řezné materiály nereagují s obráběným materiálem vůbec, jiné naopak reagují s materiálem obrobku velmi silně. O podílu difusního opotřebení rozhoduje chemické složení jak materiálu nástroje, tak materiálu obrobku. Difusní opotřebení vzniká migrací atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje. [25]



Obr. 3.3 Difusní opotřebení [25]

### Oxidační opotřebení

Vysoké teploty a okolní vzduch mají za následek oxidaci většiny kovů. Každý materiál je k oxidačnímu opotřebení náchylný s jinou intenzitou. Oxidace vzniká vlivem chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí. [25]



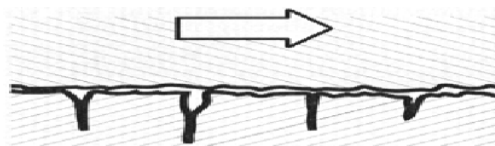
Ob. 3.4 Oxidační opotřebení [25]

### Plastická deformace

Plastická deformace je důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase, která se může ve svém nejnepříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení. [25]

### Křehký lom

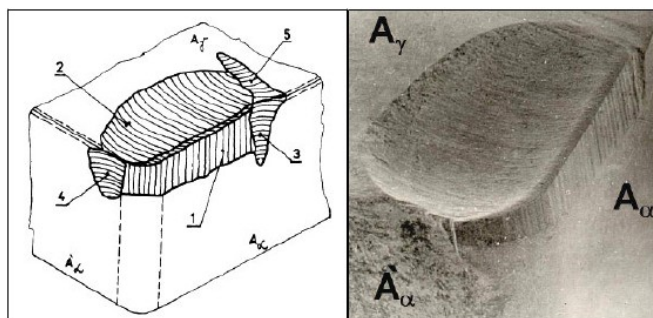
Kolísání teplot a zatížení řeznými silami mohou vést k vydrolování a lomu řezného nástroje. Křehký lom je důsledkem vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenita nebo vměstky v obráběném materiálu. [25]



Obr. 3.5 Lom statický či dynamický [25]

#### 3.1.1 Typy (druhy) opotřebení na nástroji ze SK

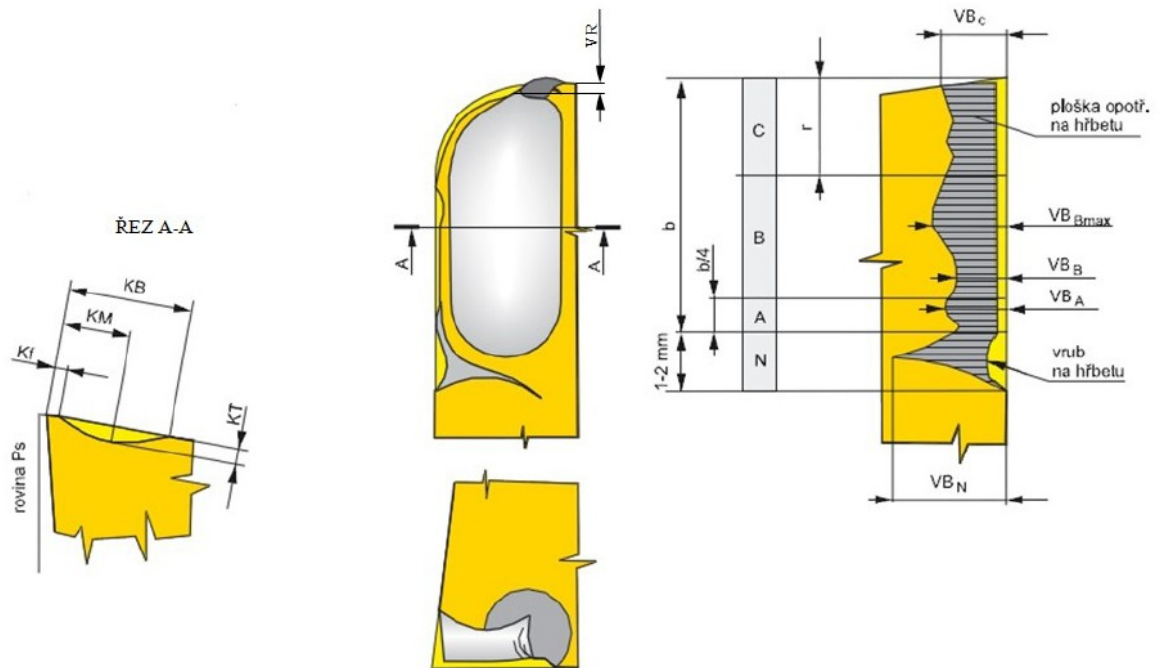
Projev procesu opotřebení na nástroji ze slinutého karbidu zobrazuje obr. 6.5 s popisem jednotlivých forem. 1 – opotřebení na hřbetu, 2 – výmol na čele, 3 – primární hřbetní rýha, 4 – sekundární hřbetní rýha, 5 – rýha na čele. [24]



Obr. 3.6 Opotřebení nástroje ze slinutého karbidu [24]

### 3.2 Měření opotřebení

Opotřebení břitu obráběcího nástroje lze určovat například podle normy ISO 3685, která uvádí následující formy opotřebení s jednotlivými charakteristikami. Pro měření opotřebení nástrojů je hlavní ostří rozděleno do 4 oblastí. Oblast C je poloměr ostří, oblast B je přímá část ostří mezi oblastmi C a A, oblast A je čtvrtina délky opotřebení nejvíce vzdálená od rádiusu nástroje a oblast N je mimo kontakt nástroje a obrobku přibližně 1 - 2 mm za hlavním ostřím nástroje. [26]



Obr. 3.7 Formy opotřebení dle ISO 3685 [26]

VB – opotřebení na hřbetě,

VB<sub>C</sub> – opotřebení v oblasti špičky nástroje,

VB<sub>N</sub> – opotřebení ve formě vrubu,

VB<sub>B</sub> – opotřebení přímé části ostří (průměrné),

VB<sub>Bmax</sub> – opotřebení maximální,

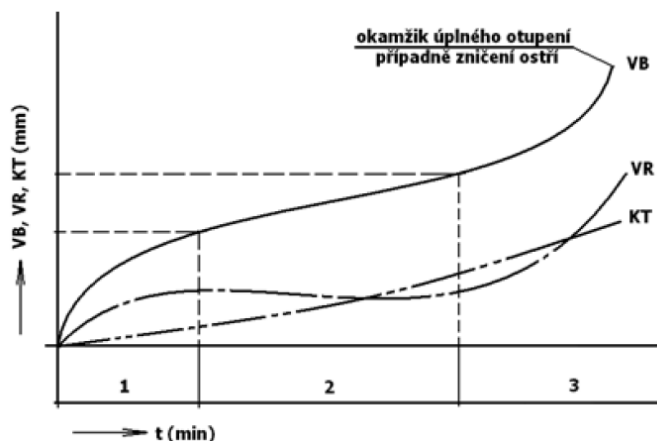
KT – hloubka výmolu na čele,

Kf – vzdálenost výmolu od čela,

KM – střední vzdálenost výmolu,

KB – šířka výmolu,

VR – radiální opotřebení [26].



Obr. 3.8 Typické průběhy opotřebení VB, VR a KT v závislosti na době řezání [27]

- 1 - Oblast zrychleného záběhového opotřebení. Obecně souvisí se záběrem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovností nástroje.
- 2 - Oblast lineárního opotřebení. V této oblasti dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je konstantní.
- 3 - Oblast zrychleného nadměrného opotřebení. Je obvykle spojeno s limitní teplotou řezání a poklesem tvrdosti nástroje. Nastává velmi rychlé, většinou lavinovité opotřebení.

Experimentální studium opotřebení a otupování bříty je základem pro určení empirických údajů pro optimalizaci řezných parametrů, resp. trvanlivosti bříty. Pro zjišťování velikosti opotřebení se používají metody přímé a nepřímé. [27]

Nevýhodou měření některých metod je nepříznivě ovlivněna jednou z následujících negativních stránek, které musí být překlenuty [27]:

- odchod třísek z místa řezu (navíjení na obrobek i nástroj, lámání, zničení nebo poškození snímače),
- procesní kapalinou,
- vibracemi a chvěním stroje,
- dobou odezvy, která bývá poměrně dlouhá,
- nízká citlivost a měnící se fyzikální vlastnosti materiálu nástroje a obrobku,
- metody měření nejsou aplikovatelné pro měnící se podmínky řezání.

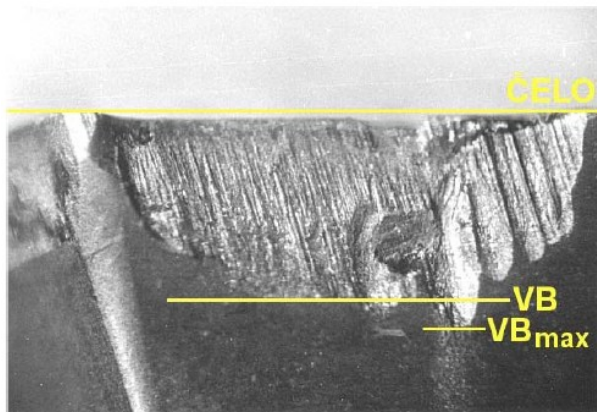
### 3.2.1 Přímé metody měření opotřebení

Přímé metody je těžké aplikovat během procesu obrábění, protože otupující se plochy jsou nedostupné pro měřicí přístroje. Pak je nutné obrábění přerušit. Přerušování ovlivňuje charakter otupení v dalších etapách experimentu. Kromě toho se ve většině případů nástroj snímá z nožového držáku, a to přináší změny podmínek obrábění při dalším upnutí a ustavení.

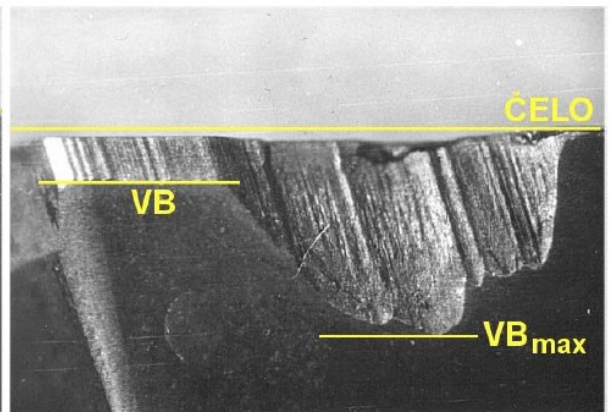
Mezi přímé metody patří [24, 25]:

- metoda váhová (hmotnostní),
- metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová),
- metoda mikrometrická,
- metoda optická (stínová),
- metoda nanesené odporové vrstvy,
- metoda pneumatická.

V praxi je pro měření opotřebení nástroje nejčastěji používána metoda přímého měření mikrometrickou metodou. Velikost opotřebení je určována přímým měřením lineárních rozměrů. Zjišťujeme ji nejčastěji dílenskými mikroskopy s křížovým stolem. Hloubku žlábků měříme číselníkovými úchylkoměry, komparátory, apod. Tuto metodu nelze použít přímo během obrábění. Destička se musí vyjmout z nožového držáku a umístit pod mikroskop.



Obr. 3.9 Pravidelná vysoká hodnota VB [24]



Obr. 3.10 Nízká hodnota VB kombinovaná s vysokou hodnotou  $VB_{max}$  [24]

### 3.2.2 Nepřímé metody měření opotřebení

Nepřímé metody se opírají o některé znaky, které proces opotřebení doprovází a provádí se přímo při procesu řezání. Všechny tyto metody jsou pouze přibližné.

Mezi nepřímé metody patří [24, 25]:

- vznik lesklého proužku na povrchu obrobku,
- vzrůst složek řezné síly,
- zvýšení výkonu a teploty řezání,
- vznik chvění nebo nežádoucího doprovodného zvuku,
- změna barvy a tvaru třísky,
- změna rozměrů obrobku a zhoršení drsnosti povrchu,
- emise signálů v pásmu ultrazvuku (akustické emise).



## 4. Integrita povrchu

Integritou povrchu se zabývá podrobněji norma ANSI B211.1 1986. Integrita povrchu závisí na výrobních metodách a podmínkách obrábění, které ovlivňují funkčnost povrchové vrstvy. S technickým vývojem stoupají nároky na kvalitu a produktivitu výroby, jsou kladeny vysoké nároky na předepsaný tvar a rozměr. Integrita povrchu je dána vhodným využitím technologických metod na obráběný materiál a má bezprostřední vliv na jakost obráběné plochy.

Integritu povrchu charakterizuje soubor charakteristik, popisující funkční vlastnosti povrchu součástí. K těmto charakteristikám řadíme [27]:

1. Topografie povrchu (geometrické charakteristiky povrchu)
2. Strukturní a fyzikálně-chemické změny v povrchové vrstvě
3. Stupeň, hloubka a charakter zpevnění
4. Smysl, velikost a průběh reziduálních pnutí

Nejdůležitější ukazatele, podle nichž sledujeme kvalitu povrchu [27]:

- Makrogeometrie obrobené plochy
- Mikrogeometrie obrobeného povrchu
- Fyzikálně-mechanické změny v povrchové vrstvě (tvrdost, zpevnění, zbytkové pnutí pod obrobeným povrchem)
- Fyzikálně chemický stav povrchu

### 4.1 Drsnost povrchu

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (risky, trhlinky, důlky) a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru. Parametry drsností se vyhodnocují na skutečných profilech, které se získávají jako průsečnice kolmé nebo šikmé roviny s povrchem. [5]

Měření a hodnocení geometrické struktury povrchu součástí je důležitým problémem v základních experimentálních výzkumech a také v průmyslové praxi. Obzvláště se to týká drsnosti povrchu, protože má veliký vliv na kvalitu spolupráce jednotlivých částí strojů. Ve strojírenském průmyslu se klade velký důraz na výrobu povrchů spolupracujících součástí s vhodnou, optimální drsností. Tento druh nerovností povrchu je jedním ze základních

ukazatelů jakosti technologických procesů, a proto je zde neustálá potřeba jeho měření a hodnocení. [5]

#### 4.1.1 Měření drsnosti povrchu

Tvar mikrogeometrických nerovností obrobených povrchů je velmi rozmanitý. Aby bylo možné kvantitativně hodnotit drsnost povrchů, byla přijata evropská norma ISO 4287. Drsnost povrchu je definována jako část geometrických odchylek s relativně malou vzdáleností nerovností. Tím se odlišuje od makrogeometrie a vlnitosti povrchu. [29] Mikrogeometrii povrchu můžeme určit přímým měřením profilu různými přístroji.

##### Rozdělení metod měření [29]:

- Kvalitativní (porovnávací) – porovnání povrchu součásti se vzorky povrchů etalonů
- Kvantitativní (parametrické) – určení číselných hodnot parametrů povrchu součásti dle příslušné normy.

##### Způsoby měření drsnosti povrchu [29]

- Kontrola porovnávání s etalony drsnosti
- Měření metodou světelného řezu
- Měření s využitím interference světla
- Měření profilovými drsnoměry

V praxi je pro měření drsnosti povrchu nejčastěji používána metoda přímého měření profilovými drsnoměry. Při použití této metody se přímo odečítají číselné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti. Využívá se pro nejmodernější statické i spektrální hodnocení nerovností povrchu. Dotykový profilometr má dvě základní části [29]:

- mechanická - stolek, na který se pokládá měřená součást, rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje konstantní rychlosti a snímací hrot snímá nerovnosti povrchu, elektromotorek, který zajišťuje vratný chod ramene,
- elektrická - transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem na elektrický signál, který se zpracovává na číselnou hodnotu nebo graf.



Obr. 4.1 Dotykový profilometr [29]

## 5. Experimentální část

Hlavním cílem experimentu bylo najít nejvhodnější řezný materiál pro obrábění niklové slitiny Inconelu 625. Testování bylo realizováno ve firmě John Crane Sigma, a.s. se sídlem v Lutíně. Nalezení řezného materiálu bylo provedeno soustružením válce Inconelu 625. Byly zkoušeny tři druhy řezných materiálů slinutých karbidů od tří různých výrobců řezných destiček. Pro jednotlivé druhy řezného materiálu byly použity řezné podmínky, u kterých se měnil pouze posuv. Řezný materiál v kombinaci s řeznými podmínkami, který dosáhne nejmenšího opotřebení na hřbetě s kombinací nejlepší drsnosti obrobeného povrchu po zadané délce ujeté dráhy nástroje a po odebraném množství materiálu, je zvolen jako nejvhodnější pro soustružení niklové slitiny Inconelu 625 nepřerušovaným řezem s použitím procesní kapaliny na cnc obráběcím stroji Mori Seiki SL - 403.

### 5.1 Obráběcí stroj

#### Obráběcí stroj

Pro obrábění niklových slitin a tím i Inconelu 625 je doporučeno používat nejtužší možný stroj, který je v daném okamžiku k dispozici. Obrábění probíhalo na jednom z cnc soustruhů ze strojového parku ve firmě John Crane Sigma, a.s. v Lutíně. Pro experiment byl zvolen horizontální cnc soustruh Mori Seiki SL - 403, který zajišťuje maximální stabilitu rychlosti s vysokou mírou přesnosti. Obráběný materiál byl na soustruhu upnut do sklíčidla.



*Obr. 5.1 Mori Seiki SL - 403 [30]*

Tab. 5.1 Technické údaje [30]

posuv osa X	345 mm
posuv osa Y	995 mm
RPM	2400
držák nástrojů typ	SK40
kapacita nástrojů	12
pracovní délka	958 mm
točný průměr nad ložem	620 mm
bar kapacita	60 mm
rychloposuv osa X	20000 mm·min <sup>-1</sup>
rychloposuv osa Y	24000 mm·min <sup>-1</sup>
výkon vřetena	40/30 kW
rozměry stroje: š x h	3789 mm x 2338 mm

## 5.2 Obráběný materiál

Pro provedení experimentu byl zvolen materiál Inconel alloy 625<sup>®</sup>. Je to chromniklová slitina, která se vyznačuje vysokou pevností a vynikající odolností zejména proti důlkové, šterbinové a mezikrystalové korozi. Vysokou pevnost získává díky zpevňujícímu účinku molybdenu a niklu, má vysokou odolnost proti procesu oxidace při vyšších teplotách, až do 1050°C a není jej nutné kalit. [31, 32]

Dále si tento materiál zachovává vynikající mechanické vlastnosti při extrémně nízkých a extrémně vysokých teplotách a má dobrou odolnost vůči dusičné, fosforečné, sírové a chlorovodíkové kyselině a proti alkáliím. Díky svým vlastnostem se používá v leteckém průmyslu, u spalovacích turbín, v chemickém průmyslu, v jaderném a lodním průmyslu, průmyslu ochrany životního prostředí a u těžby ropy a zemního plynu. [31, 32]

Tab. 5.2 Chemické složení [32]

Prvek	hm. %	Prvek	hm. %
Nikl	58 min	Křemík	0,50 max
Chrom	20,0 ÷ 23,0	Fosfor	0,015 max
Železo	5,0 max	Síra	0,015 max
Molybden	8,0 ÷ 10,0	Hliník	0,40 max
Niob (plus Tantal)	3,15 ÷ 4,15	Titan	0,40 max
Uhlík	0,10 max	Kobalt	1,0 max
Mangan	0,50 max		

Tab. 5.3 Mechanické vlastnosti [31]

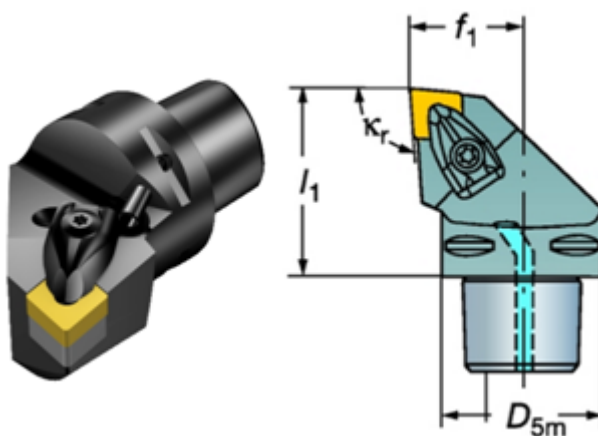
Měrná hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	8,44
$R_m$ [MPa]	862
$R_{p0,2}$ [MPa]	448
$A$ [%]	50
Tvrdost [HV]	200

### 5.3 Volba řezných nástrojů a řezných materiálů

Pro provedení experimentu byly zvoleny vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu od tří firem. Z firmy Iscar s.r.o. byla použita vyměnitelná břitová destička z nástrojového materiálu IC 806 s označením CNMG 120408 - TF, od firmy Sandvik Coromant s.r.o. byla použita destička z nástrojového materiálu GC 1115 s označením CNMG 120416 - SMR a od firmy Seco Tools s.r.o. byla použita destička z materiálu TM 4000 s označením CNMG 120408 - M5. Tyto destičky byly upínány do nožového držáku firmy Sandvik Coromant s.r.o. s označením C5 - DCLNR - 35060 - 12.

#### 5.3.1 Použitý nožový držák

Nožový držák použitý na upínání břitových destiček měl negativní geometrii břitu  $\gamma_o = -6^\circ$ ,  $\lambda_s = -6^\circ$ ,  $\kappa_r = 95^\circ$ . Destičky se upínají do lůžka pomocí pákového mechanismu. Do nožového držáku typu C5 - DCLNR - 35060 - 12 se upínají destičky ve tvaru kosočtverce. Nožový držák je zobrazen na obrázku 5.2.



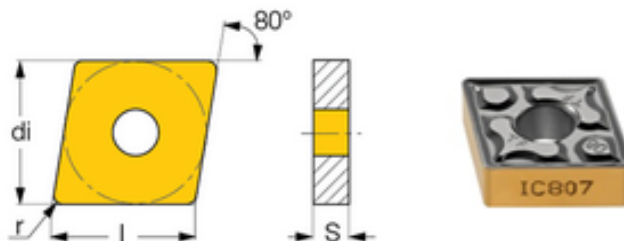
Obr. 5.2 C5 - DCLNR - 35060 - 12 [33]

Tab. 5.4 Základní rozměry nožového držáku [33]

	$l_1$ [mm]	$f_1$ [mm]	$\kappa_r$ [°]	$D_{5m}$ [mm]
C5 - DCLNR - 35060 - 12	60	35	95	50

### 5.3.2 Použitá vyměnitelná břitová destička firmy Iscar s.r.o

Z firmy Iscar s.r.o. byla v experimentu použita vyměnitelná břitová destička ve tvaru kosočtverce s označením CNMG 120408 - TF, která je z materiálu IC 806. Destička je zobrazena na obrázku 5.3 a v tabulce 5.5 jsou uvedeny základní rozměry VBD.



Obr. 5.3 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120408 - TF [34]

Tab. 5.5 Základní rozměry VBD firmy Iscar s.r.o. [34]

	l [mm]	di [mm]	s [mm]	r [mm]
CNMG 120408 - TF	19,90	12,70	4,76	0,80

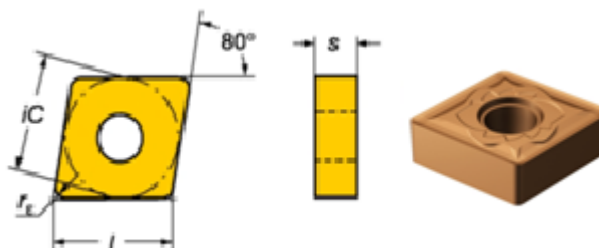
Materiál s označením IC 806 tvoří houževnatý submikronový substrát. Povlak (Ti, Al)N je na destičku nanesený metodou PVD, po kterém následuje speciální SUMO TEC úprava. Tento materiál je vhodný pro soustružení niklových slitin při nízkých až středních rychlostech [34]. Doporučené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 5.6.

Tab. 5.6 Řezné podmínky doporučené výrobcem [34]

ap [mm]	f [mm]	vc [m/min]
1,00 - 4,00	0,12 - 0,35	30 - 55

### 5.3.3 Použitá vyměnitelná břitová destička firmy Sandvik Coromant s.r.o

Z firmy Sandvik Coromant s.r.o. byla v experimentu použita vyměnitelná břitová destička ve tvaru kosočtverce s označením CNMG 120416 - SMR, která je z materiálu GC 1115. Destička je zobrazena na obrázku 5.4 a v tabulce 5.7 jsou uvedeny základní rozměry VBD.



Obr. 5.4 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120416 - SMR [35]

Tab. 5.7 Základní rozměry VBD firmy Sandvik Coromant s.r.o. [35]

	l [mm]	iC [mm]	s [mm]	r <sub>e</sub> [mm]
CNMG 120416 - SMR	12,00	12,70	4,76	1,60

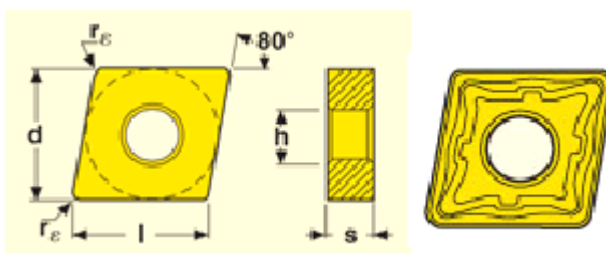
Materiál s označením GC 1115 tvoří tenký PVD povlak s velmi dobrou adhezí, který je nanesený na jemnozrnném substrátu s vysokou tvrdostí za zvýšených teplot a dobrou odolností proti plastické deformaci v kombinaci s dobrou spolehlivostí bříty. Vynikající odolnost proti ulpívání materiálu obrobku na břítu. Houževnatá třída s dobrou odolností proti opotřebení ve tvaru žlábků, stejně tak i opotřebení hřbetu, třída s vysokou výkonností. [35]

Tab. 5.8 Řezné podmínky doporučené výrobcem [35]

ap [mm]	f [mm]	v <sub>c</sub> [m/min]
0,5 - 4,00	0,15 - 0,45	25 - 65

### 5.3.4 Použitá vyměnitelná břitová destička firmy Seco Tools s.r.o.

Z firmy Seco Tools s.r.o. byla v experimentu použita vyměnitelná břitová destička ve tvaru kosočtverce s označením CNMG 120408 - M5, která je z materiálu TM4000. Destička je zobrazena na obrázku 5.5 a v tabulce 5.9 jsou uvedeny základní rozměry VBD.



Obr. 5.5 Vyměnitelná břitová destička CNMG 120408 - M5 [36]

Tab. 5.9 Základní rozměry VBD firmy Seco Tools s.r.o. [36]

	l [mm]	d [mm]	s [mm]	r <sub>e</sub> [mm]
CNMG 120408 - M5	12,90	12,70	4,76	0,80

Materiál s označením TM4000 je určený pro niklové slitiny od dokončování až po těžké hrubovací operace. Je zde nanesen povlak Duratomic, Ti (C, N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, jehož předností je odolnost proti opotřebení hřbetu a tvoření nárůstků [36]. Doporučené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 5.10.

Tab. 5.10 Řezné podmínky doporučené výrobcem [37]

ap [mm]	f [mm]	v <sub>c</sub> [m/min]
0,5 - 4,00	0,25 - 0,6	115 - 155

### 5.3.5 Volba řezných podmínek

Volba řezných podmínek byla zvolena, tak aby byly řezné podmínky pro všechny vyměnitelné břitové destičky stejné, přičemž bylo zohledněno doporučení dle výrobce. Hloubka řezu byla v průběhu celého experimentu konstantní a byla zvolena dle druhu operace, a to hrubovací soustružení a dále byla zohledněna podle doporučených hodnot výrobců VBD. Pro všechny prováděné experimenty byla zvolena hloubka řezu  $a_p = 2,5$  mm. Při volbě hodnoty posuvu a řezné rychlosti se vycházelo převážně z toho, aby byl materiál co nejrychleji odebrán a také z doporučených hodnot, proto byly pro provedení experimentů zvoleny dvě hodnoty posuvu  $f_{n1} = 0,3$  mm a  $f_{n2} = 0,5$  mm, aby bylo možné co nejlépe porovnat destičky výrobců Iscar s.r.o., Sandvik s.r.o. a Seco Tools s.r.o. Řezná rychlost byla zvolena po konzultaci s výrobcí pro všechny použité břitové destičky konstantní. Řezná rychlost byla  $v_c = 50$  m·min<sup>-1</sup>.

Tab. 5.11 Použité řezné parametry

$a_p$ [mm]	$f_n$ [mm]		$v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]
	$f_{n1}$	$f_{n2}$	
2,5	0,3	0,5	50

### 5.4 Měření opotřebení

Měření opotřebení hřbetu vyměnitelných břitových destiček bylo realizováno mikrometrickou metodou, při které je velikost opotřebení určována přímým měřením lineárních rozměrů. Byl použit mikroskop, vybavený digitální kamerou, který umožňuje několikanásobně zvětšit obraz. Díky digitalizaci bylo možné mikroskop připojit k počítači, ve kterém bylo možné pomocí programu Motic Images Plus 2.0 ML on-line změřit opotřebení vyměnitelné břitové destičky. Pro správné naměření hodnoty opotřebení vyměnitelné břitové destičky bylo třeba provést pro jednotlivá zvětšení kalibraci software Motic Images Plus 2.0 ML. Kalibrace se provede pomocí kalibrační měrky, která se vyfotografuje při stejném zvětšení jako měřená vyměnitelná břitová destička.

#### Mikroskop

K měření opotřebení byl použit digitální mikroskop Deluxe od firmy Celestron, LLC vybavený videokamerou, která umožňuje několikanásobně zvětšit detail destičky. Na tomto přístroji byly pořízeny snímky opotřebovaných VBD, ze kterých se určovaly hodnoty jednotlivých opotřebení. Mikroskop má zdroj světla, který dokonale osvětloval měřenou



oblast. U tohoto mikroskopu je možné jak focení, tak nahrávání videa přes software, který je určen pro operační systémy Windows XP/Vista/7. Díky digitalizaci bylo možné mikroskop připojit k počítači, ve kterém bylo možné změřit opotřebení vyměnitelné břitové destičky.



*Obr. 5.6 Digitální mikroskop Deluxe [38]*

*Tab. 5.12 Technické údaje [38]*

Zvětšení: 10x - 40x až 150x
LED osvětlení
Připojení i napájení přes USB 2.0 kabel
Kamera: 2 MPx
Kovový stojan
Rozměry: 108 mm x 32 mm
Hmotnost: 113 g

## 5.5 Výpočet objemu odebraného materiálu

Objemem odebraného materiálu se rozumí, kolik milimetrů krychlových materiálu břit vyměnitelné břitové destičky obrobil do dosažení předem dané hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje. Tato hodnota byla změřena, respektive vypočítána z času, z aktuální řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu podle vztahů:

*Výpočet otáček*

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (5.1)$$

kde:  $n$  - otáčky vřetena [ $\text{min}^{-1}$ ]  
 $v_c$  - řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]  
 $D$  - obráběný průměr [mm]

*Výpočet strojního času*

$$T_{AS} = \frac{l}{f_n \cdot n} \quad (5.2)$$

kde:  $T_{AS}$  - strojní čas [min]  
 $l$  - řezná délka [mm]  
 $f_n$  - aktuální posuv na otáčku [mm]  
 $n$  - otáčky vřetena [ $\text{min}^{-1}$ ]

*Množství odebraného materiálu*

$$V = v_c \cdot a_p \cdot f_n \cdot T_{AS} \quad (5.3)$$

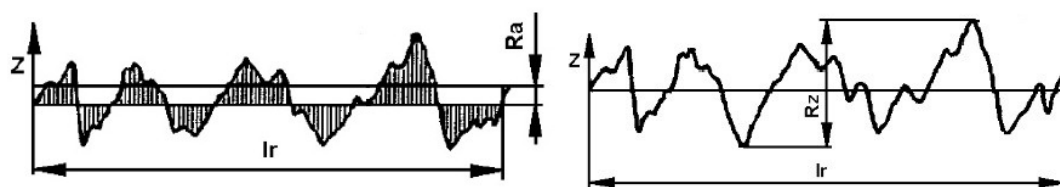
kde:  $V$  - množství odebraného materiálu [ $\text{mm}^3$ ]  
 $v_c$  - použitá řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]  
 $a_p$  - použitá hloubka řezu [mm]  
 $f_n$  - aktuální posuv na otáčku [mm]  
 $T_{AS}$  - strojní čas [min]

## 5.6 Měření drsnosti povrchu

Pro vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu byly zvoleny dva parametry, které se nejčastěji používají v praxi [29]:

$R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] - průměrná aritmetická úchylka profilu - aritmetický průměr absolutních hodnot v rozsahu základní délky,

$R_z$  [ $\mu\text{m}$ ] - největší výška profilu - součet výšky největšího výstupku a hloubky největší prohlubně v rozsahu základní délky.

Obr. 5.7 Použité parametry drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  [29]

### Drsnoměr

Drsnost povrchu byla měřena pomocí drsnoměru Surftest SJ - 210 od firmy Mitutoyo, který má funkci automatické dynamické kalibrace, snímač s vysokým rozlišením a velkým rozsahem měření a výměnnou posuvovou jednotkou pro měření ve velmi těsných prostorech. Přístroj SJ - 210 umožňuje hodnocení struktury povrchu, vlnitosti povrchu a mnoha dalších parametrů podle různých národních i mezinárodních norem. Naměřené hodnoty se na displeji zobrazují digitálně nebo graficky.

Princip měření tímto přístrojem spočívá v tom, že dotykový hrot snímací jednotky zaznamenává drobné nepravidelnosti povrchu měřeného výrobku. Drsnost povrchu se stanoví na základě vertikálního posunu dotykového hrotu způsobeného přejížděním po nepravidelnostech povrchu.



Obr. 5.8 Drsnoměr Surftest SJ - 210 [39]

Tab. 5.13 Technické údaje [39]

Zdvih (rozsah osy Z)	[ $\mu\text{m}$ ]	350
Posuv (rozsah osy X)	[mm]	12,5
Rychlost najetí (měření)	[ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	0,25; 0,5
Rychlost zpětného posuvu	[ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	0,8
Poloměr snímacího hrotu	[ $\mu\text{m}$ ]	2
Měřicí síla	[mN]	0,75

## 6. Zpracování a srovnání výsledků měření

Měření opotřebení vyměnitelných břitových destiček bylo prováděno v úsecích, kdy bylo přerušeno obrábění, a to po určitých řezných délkách, kdy každá řezná délka byla 50 mm. Z polotovaru bylo pro každou destičku odebráno pro posuv  $f_{n1} = 0,3$  mm pět úběrů materiálu, každý o hloubce řezu 2,5 mm a pro posuv  $f_{n2} = 0,5$  mm tři úběry materiálu, každý také o hloubce 2,5 mm. Z důvodu omezeného množství kusů polotovarů, nebyly zkoušky realizovány až do úplného otupení břitu. Velikost opotřebení břitu destičky a drsnost obrobeného povrchu byly srovnávány podle stanovené hodnoty opotřebení hřbetu a to pro posuv  $f_{n1} = 0,3$  mm bylo stanoveno  $VB = 0,3$  mm a pro posuv  $f_{n2} = 0,5$  mm bylo stanoveno  $VB = 0,4$  mm.

Drsnost povrchu byla měřena v podélném směru (rovnoběžně se směrem posuvu) vždy ve třech místech na obráběném válci (po  $120^\circ$ ). Měření drsnosti bylo provedeno vždy, když bylo měřeno opotřebení hřbetu jednotlivých břitů vyměnitelné břitové destičky. Měřilo se přímo na obráběcím stroji. Z naměřených hodnot byl vypočítán výběrový průměr.

Jelikož byl experiment proveden na třech různých vyměnitelných břitových destičkách, z nichž každá obráběla v kombinaci dvou posuvů, není v této části diplomové práce uvedena veškerá fotografická dokumentace týkající se opotřebení břitových destiček. Veškerá fotografická dokumentace je uložena na přiloženém CD.

*Výběrový průměr*

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

kde:  $\bar{x}$  - výběrový průměr

$x_i$  - jednotlivé naměřené hodnoty veličiny  $x$

$n$  - počet měření

## 6.1 Zpracování výsledků pro $f_{n1} = 0,3 \text{ mm}$

### 6.1 Tabulka naměřených hodnot pro posuv $f_{n1} = 0,3 \text{ mm}$

	v <sub>c</sub> [m·min <sup>-1</sup> ]			f <sub>nl</sub> [mm]		a <sub>p</sub> [mm]		D [mm]		
	50			0,3		2,5		163/158/153/148/143		
	Iscar s.r.o. CNMG 120408 - TF			Sandvik s.r.o. CNMG 120416 - SMR			Seco Tools s.r.o. CNMG 120408 - M5			
i	VB [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	VB [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	VB [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	
1	0,16	2,44	6,89	0,11	2,19	8,76	0,23	2,96	11,28	
		2,15	8,57		2,26	9,57		2,85	10,15	
		2,32	7,64		2,07	8,54		2,66	10,30	
$\bar{x}$		<b>2,30</b>	<b>7,70</b>		<b>2,17</b>	<b>8,96</b>		<b>2,82</b>	<b>10,57</b>	
2	0,18	2,37	9,16	0,13	2,26	11,65	0,28	3,35	13,58	
		2,46	10,16		2,36	9,14		3,45	13,30	
		2,63	9,58		2,28	10,27		3,48	14,45	
$\bar{x}$		<b>2,49</b>	<b>9,63</b>		<b>2,30</b>	<b>10,35</b>		<b>3,43</b>	<b>13,78</b>	
3	0,22	3,17	12,15	0,22	2,75	13,30	0,33	4,12	16,59	
		2,87	11,85		2,98	14,14		3,87	17,27	
		2,93	12,26		3,12	13,49		3,95	17,92	
$\bar{x}$		<b>2,99</b>	<b>12,09</b>		<b>2,95</b>	<b>13,64</b>		<b>3,98</b>	<b>17,26</b>	
4	0,25	2,97	13,69	0,25	3,47	17,66	0,38	4,20	19,52	
		3,15	14,23		3,27	15,33		4,27	20,36	
		3,27	11,13		3,36	16,85		4,23	19,16	
$\bar{x}$		<b>3,13</b>	<b>13,01</b>		<b>3,37</b>	<b>16,61</b>		<b>4,23</b>	<b>19,68</b>	
5	0,30	3,33	13,65	0,34	4,17	18,74	0,51	4,87	21,36	
		3,16	14,87		3,85	19,22		4,62	21,60	
		3,27	14,79		3,92	18,33		4,74	21,17	
$\bar{x}$		<b>3,25</b>	<b>14,44</b>		<b>3,98</b>	<b>18,76</b>		<b>4,74</b>	<b>21,38</b>	



*Obr. 6.1 Opotřebení hřbetu destičky CNMG 120408 - TF ( $VB = 0,30\text{ mm}$ )*



*Obr. 6.2 Opotřebení hřbetu destičky CNMG 120416 - SMR ( $VB = 0,34\text{ mm}$ )*

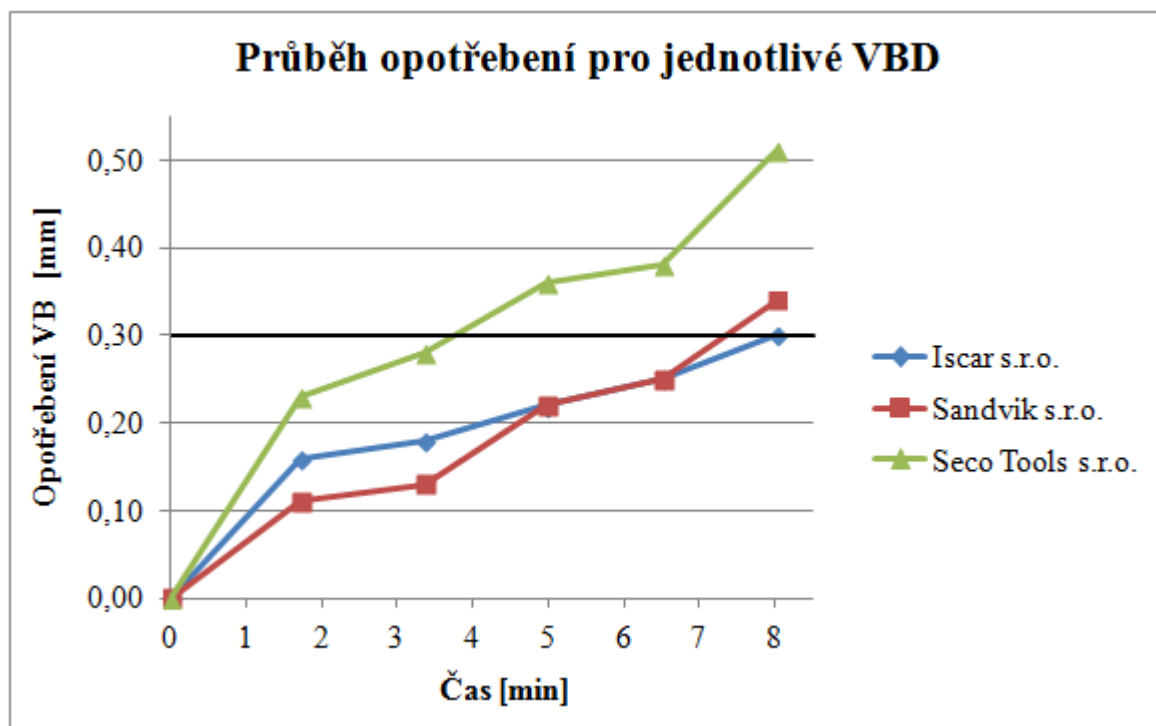


*Obr. 6.3 Opotřebení hřbetu destičky CNMG 120408 - M5 ( $VB = 0,51\text{ mm}$ )*

Obrázky odpovídají hodnotám uvedeným v tabulce 6.1. Takovéto fotografie byly vytvořeny i pro zbývající případy měření v experimentu, které jsou uloženy na přiloženém CD.

Z tabulky 6.1 byla následně vytvořena závislost opotřebení bříty na čase (graf 6.1). Z grafu je patrný průběh opotřebení nástroje, tak jak je běžně popisován v literatuře. Břit se nejprve v první fázi otupuje rychle, pak nastává druhá fáze, kde nástroj obrábí bez výrazného zvýšení opotřebení až do momentu, kdy nastane třetí fáze, a to zrychlené opotřebení nástroje a ztráta možnosti dále obrábět.

Graf 6.1 Závislost opotřebení hřbetu na čase



Pomocí grafu 6.1 byla určena přesná doba obrábění do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě  $VB = 0,3 \text{ mm}$  pro každou vyměnitelnou břitovou destičku. Z tabulky 6.1 byl určen podle vzorce 5.3 objem odebraného materiálu.

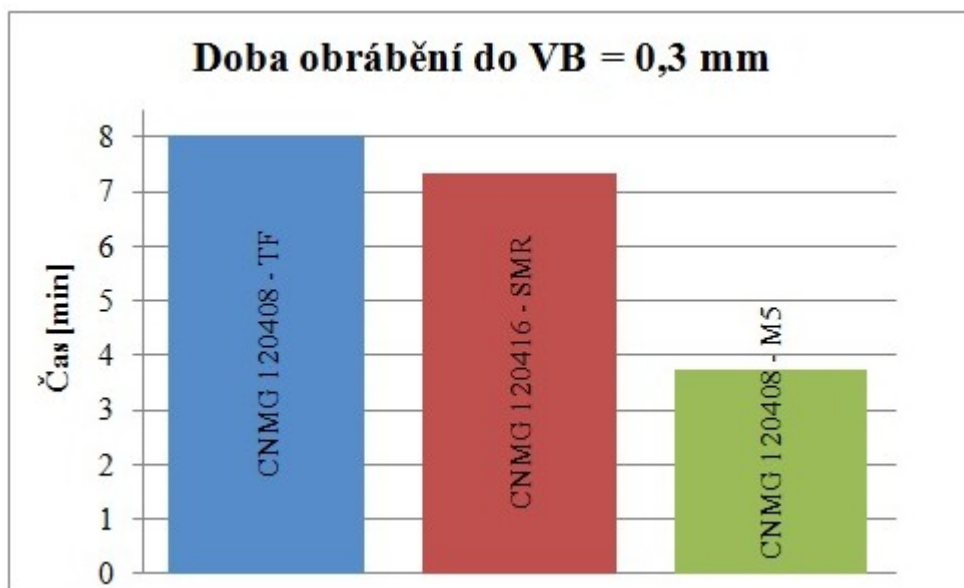
Tab. 6.2 Konečné výsledky VBD pro  $f_{nl} = 0,3 \text{ mm}$  do dosažení  $VB = 0,3 \text{ mm}$ 

VBD	T	V	Ra	Rz
	[min]	[mm <sup>3</sup> ]	[μm]	[μm]
CNMG 120408 - TF	8	300000	3,25	14,4
CNMG 120416 - SMR	7,35	275625	3,8	17,85
CNMG 120408 - M5	3,75	140625	3,6	14,6

Pomocí vytvořené tabulky pro jednotlivé vyměnitelné břitové destičky byly vytvořeny grafy, kde byly porovnány časy, objem odebraného materiálu a parametry drsnosti Ra a Rz do dosažení zvoleného kritéria opotřebení  $VB = 0,3 \text{ mm}$ .

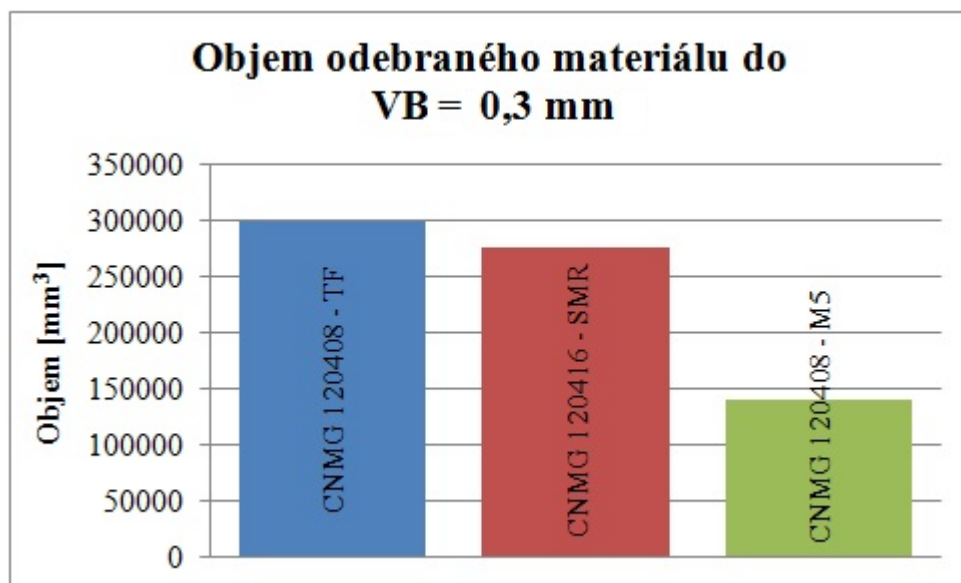
Pro vyměnitelné břitové destičky byla zvolená řezná rychlost  $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a posuv  $f_n = 0,3 \text{ mm}$ , kdy destička CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.) dokázala soustružit do opotřebení  $VB = 0,3 \text{ mm}$  materiál vzorku 8 min. Destička CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.) vydržela v řezu 7,35 min. a destička CNMG 120408 - M5 (Seco Tools, s.r.o.) vydržela v řezu podstatně kratší dobu a to 3,75 min. Srovnání dosažených dob obrábění do otupení břitu na hodnotu  $VB = 0,3 \text{ mm}$  je zobrazeno na grafu 6.2.

Graf 6.2 Srovnání časů obrábění jednotlivých břitových destiček



Na níže uvedeném grafu 6.3 jsou uvedeny dosažené hodnoty objemu odebraného materiálu jednotlivých vyměnitelných břitových destiček do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě VB = 0,3 mm.

Graf 6.3 Srovnání objemů odebraného materiálu jednotlivými břitovými destičkami

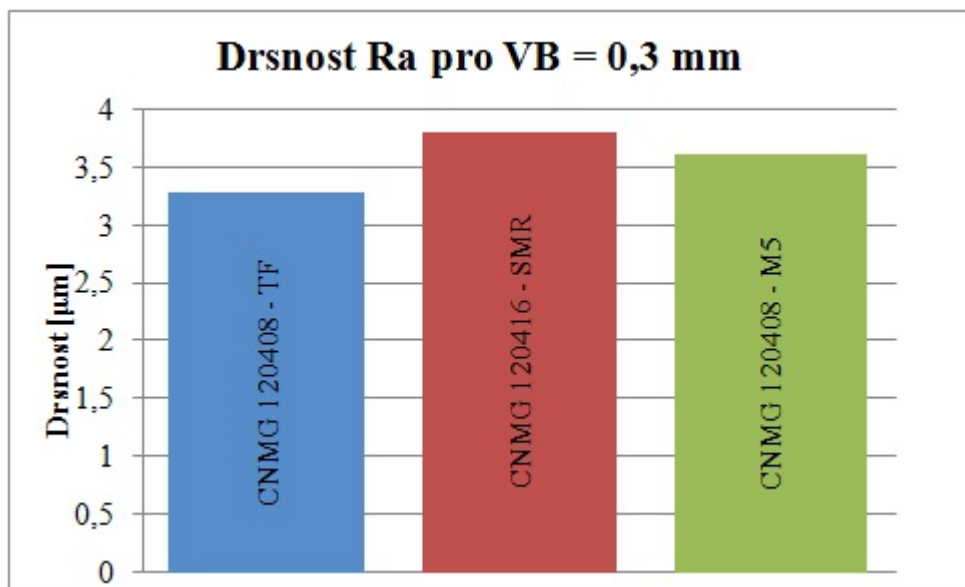


Jak je možné vidět na grafu 6.3, nejvíce materiálu do opotřebení VB = 0,3 mm odebrala vyměnitelná břitová destička CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.) objem 300000 mm<sup>3</sup> materiálu. Destička CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.) dokázala odebrat 275625 mm<sup>3</sup> a vyměnitelná břitová destička firmy Seco Tools, s.r.o. CNMG 120408 - M5 dokázala odebrat 140625 mm<sup>3</sup>.



Na grafu 6.4 jsou uvedeny hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu  $R_a$  dosažené při soustružení Inconelu 625 jednotlivými břitovými destičkami při zvolených řezných podmínkách. Hodnoty jsou výslednicí průběhu hodnot drsnosti do dosaženého zvoleného kritéria opotřebení hřbetu  $VB = 0,3 \text{ mm}$ .

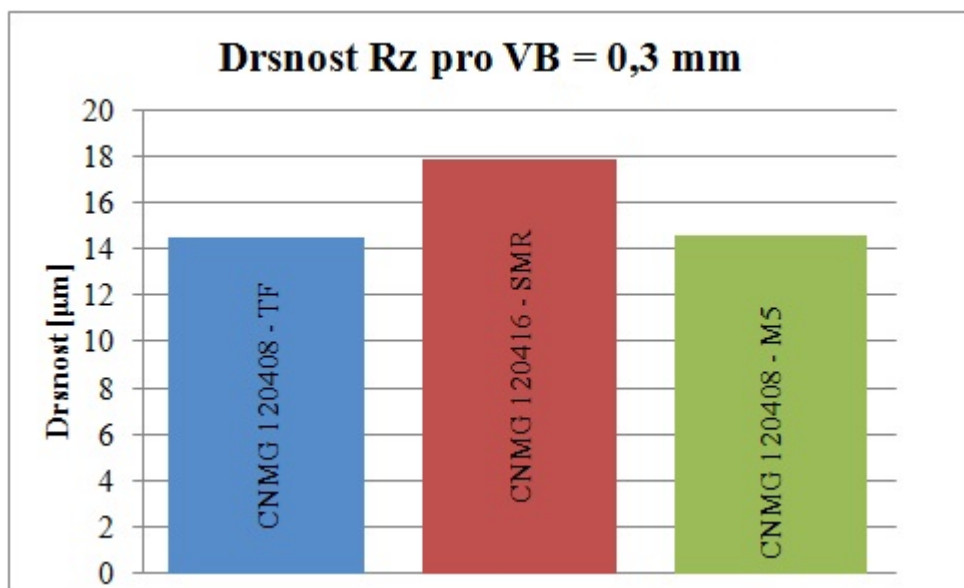
Graf 6.4 Srovnání drsnosti  $R_a$  pro  $VB = 0,3 \text{ mm}$



Nejlepší dosažená průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a = 3,25 \text{ }\mu\text{m}$  byla pro destičku CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.). Destička CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.) dosáhla drsnosti  $R_a = 3,8 \text{ }\mu\text{m}$  a vyměnitelná břitová destička CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.) dosáhla hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu  $R_a = 3,6 \text{ }\mu\text{m}$ .

Na následujícím grafu 6.5 jsou uvedeny výběrové průměry největších výšek profilu  $R_z$  naměřených do dosaženého zvoleného kritéria opotřebení hřbetu  $VB = 0,3 \text{ mm}$ . Kde z hodnot na grafu 6.5 je zřejmé, že destička firmy Iscar s.r.o. CNMG 120408 - TF dosáhla nejnížší hodnoty největší výšky profilu  $R_z = 14,4 \text{ }\mu\text{m}$ , druhé nejnížší hodnoty dosáhla destička CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.)  $R_z = 14,6 \text{ }\mu\text{m}$ . Nejvyšší hodnoty největší výšky profilu dosáhla destička firmy Sandvik s.r.o.  $R_z = 17,85 \text{ }\mu\text{m}$

Graf 6.5 Srovnání drsnosti Rz pro VB = 0,3 mm



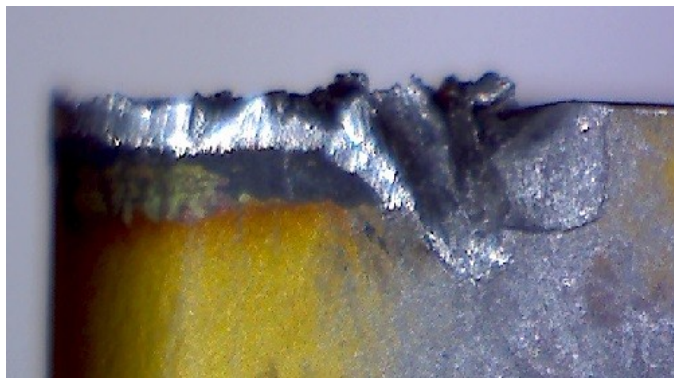
## 6.2 Zpracování výsledků pro $f_{n2} = 0,5$ mm

Tab. 6.3 Tabulka naměřených hodnot pro posuv  $f_{n2} = 0,5$  mm

	v <sub>c</sub> [m·min <sup>-1</sup> ]		f <sub>n2</sub> [mm]	a <sub>p</sub> [mm]		D [mm]			
	50		0,5	2,5		138/133/128			
	Iscar s.r.o. CNMG 120408 - TF			Sandvik s.r.o. CNMG 120416 - SMR			Seco Tools s.r.o. CNMG 120408 - M5		
i	VB [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	VB [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	VB [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,28	4,33	15,66	0,41	3,27	10,37	0,32	2,98	11,36
		5,27	17,25		3,15	11,95		2,85	13,26
		4,85	15,90		2,97	11,65		3,17	12,26
$\overline{x}$		<b>4,81</b>	<b>16,27</b>		<b>3,13</b>	<b>11,32</b>		<b>3,00</b>	<b>12,29</b>
2	0,41	5,96	24,63	0,65	3,58	17,89	0,51	3,69	16,53
		6,85	27,37		3,92	19,65		3,52	18,55
		6,16	26,95		3,80	17,69		3,67	17,50
$\overline{x}$		<b>6,33</b>	<b>26,32</b>		<b>3,76</b>	<b>18,41</b>		<b>3,63</b>	<b>17,53</b>
3	0,35	8,70	34,27	0,53	4,76	23,14	0,40	4,40	23,66
		8,25	32,14		4,65	21,15		4,28	21,28
		8,33	33,87		4,83	21,65		4,16	23,95
$\overline{x}$		<b>8,42</b>	<b>33,42</b>		<b>4,75</b>	<b>21,98</b>		<b>4,28</b>	<b>22,96</b>



*Obr. 6.4 Opotřebení hřbetu destičky CNMG 120408 - TF ( $VB = 0,35\text{ mm}$ )*



*Obr. 6.5 Opotřebení hřbetu destičky CNMG 120416 - SMR ( $VB = 0,53\text{ mm}$ )*

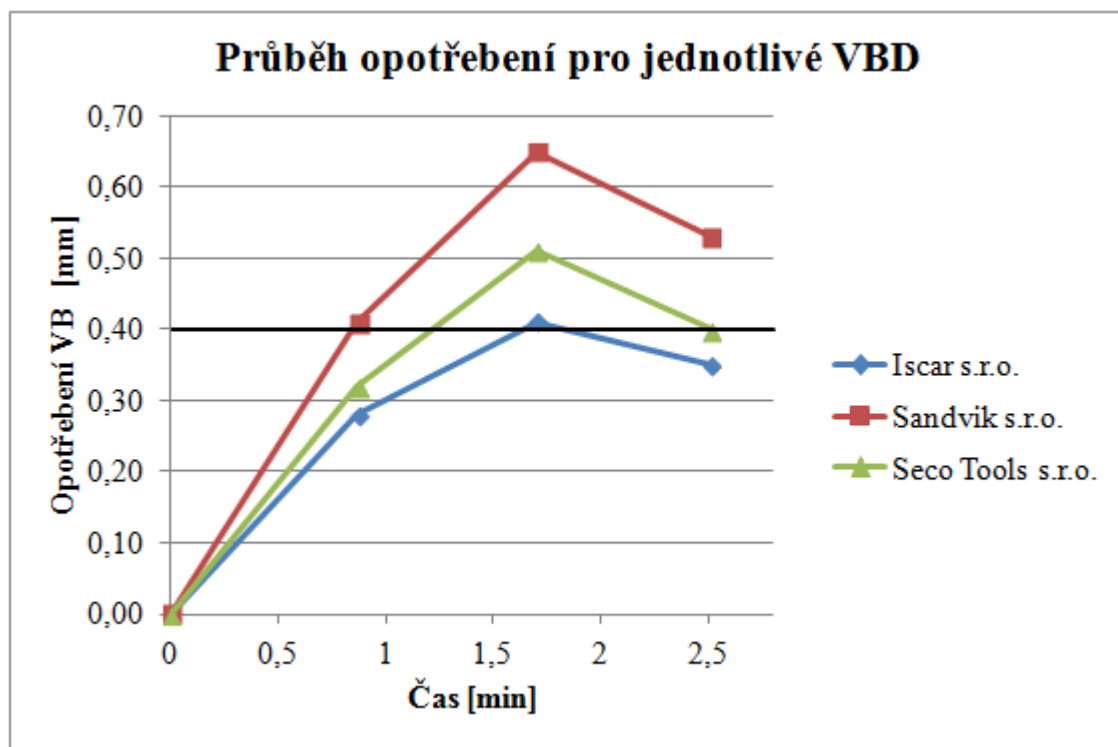


*Obr. 6.6 Opotřebení hřbetu destičky CNMG 120408 - M5 ( $VB = 0,40\text{ mm}$ )*

Obrázky odpovídají hodnotám uvedeným v tabulce 6.3 Takovéto fotografie, byly vytvořeny i pro zbývající případy měření v experimentu, které jsou uloženy na přiloženém CD.

Z tabulky 6.3 byla následně vytvořena závislost opotřebení bříty na čase (graf 6.6). Z grafu je patrný průběh opotřebení nástroje, kdy docházelo u břitových destiček k tvorbě a následnému odlamování nárůstků, jejichž tvorba je charakteristická u soustružení niklových slitin. [5, 12, 14]

Graf 6.6 Závislost opotřebení hřbetu na čase



Pomocí grafu 6.6 byla určena přesná doba obrábění do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě  $VB = 0,4 \text{ mm}$  pro každou vyměnitelnou břitovou destičku. Z tabulky 6.3 byl určen podle vzorce 5.3 objem odebraného materiálu.

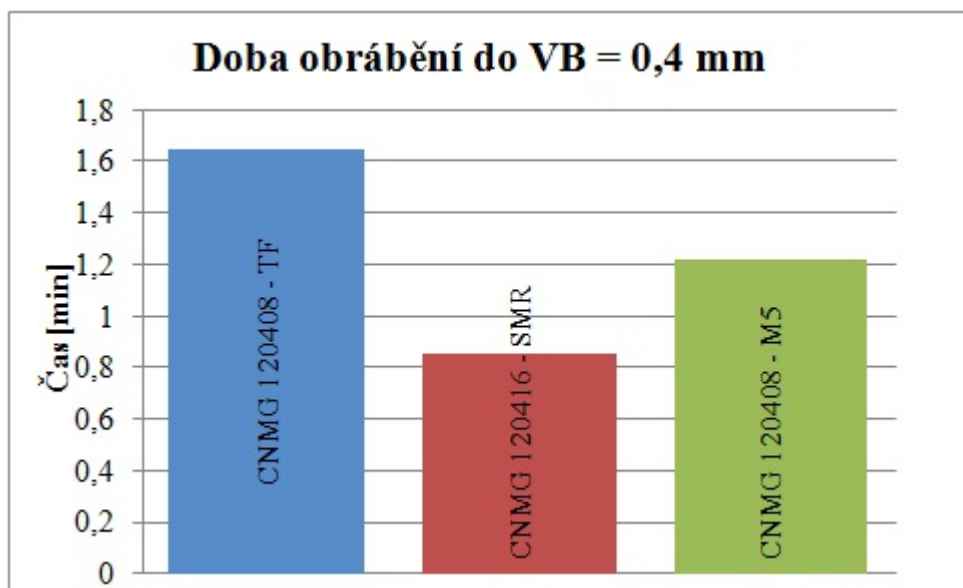
Tab. 6.4 Konečné výsledky VBD pro  $f_n = 0,5 \text{ mm}$  do dosažení  $VB = 0,4 \text{ mm}$ 

VBD	T	V	Ra	Rz
	[min]	[mm <sup>3</sup> ]	[μm]	[μm]
CNMG 120408 - TF	1,64	102500	6,3	25,6
CNMG 120416 - SMR	0,85	53125	3,1	11,2
CNMG 120408 - M5	1,22	76250	3,25	14,45

Pomocí vytvořené tabulky pro jednotlivé vyměnitelné břitové destičky byly vytvořeny grafy, kde byly porovnány časy, objem odebraného materiálu a parametry drsnosti Ra a Rz do dosažení zvoleného kritéria opotřebení  $VB = 0,4 \text{ mm}$ .

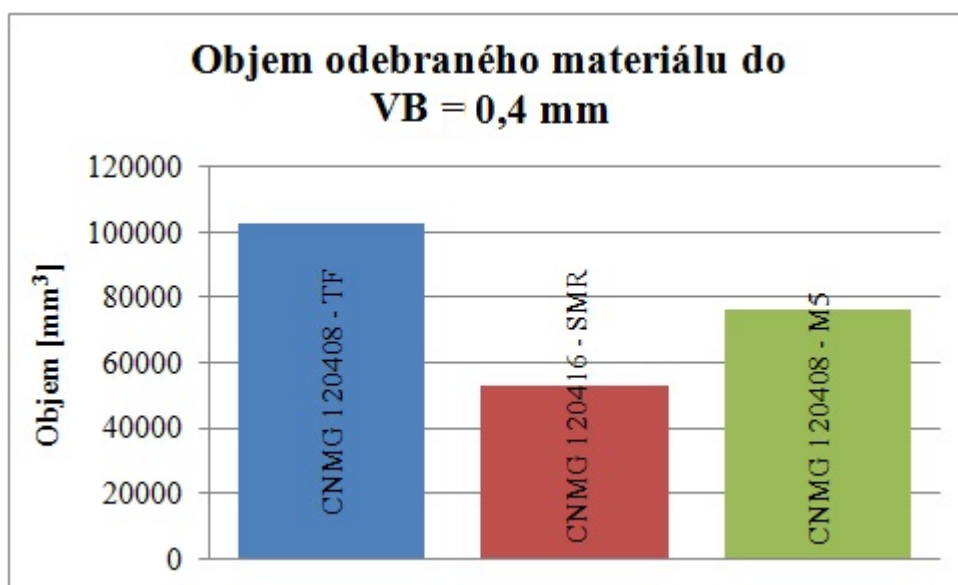
Pro vyměnitelné břitové destičky byla zvolena řezná rychlost  $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a posuv  $f_{n2} = 0,5 \text{ mm}$ , kdy destička CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.) dokázala soustružit do opotřebení  $VB = 0,4 \text{ mm}$  materiál vzorku 1,64 min. Destička CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.) vydržela v řezu 0,85 min. a destička CNMG 120408 - M5 (Seco Tools, s.r.o.) vydržela v řezu podstatně kratší dobu a to 1,22 min. Srovnání dosažených dob obrábění do otupení břitu na hodnotu  $VB = 0,4 \text{ mm}$  je zobrazeno na grafu 6.7.

Graf 6.7 Srovnání časů obrábění jednotlivých břitových destiček



Na níže uvedeném grafu 6.8 jsou uvedeny dosažené hodnoty objemu odebraného materiálu jednotlivých vyměnitelných břitových destiček do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě  $VB = 0,4$  mm.

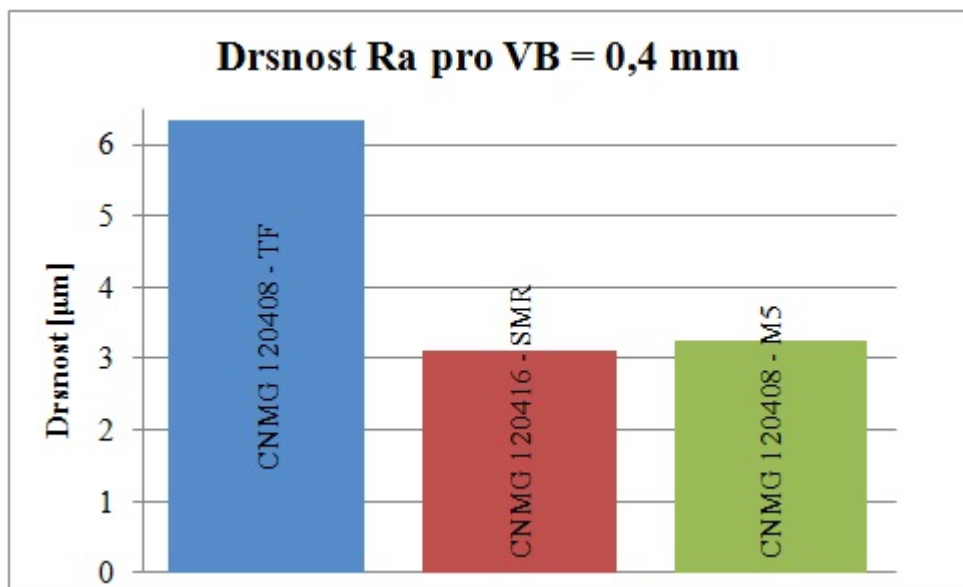
Graf 6.8 Srovnání objemů odebraného materiálu jednotlivými břitovými destičkami



Jak je možné vidět na grafu 6.8, nejvíce materiálu do opotřebení  $VB = 0,4$  mm odebrala vyměnitelná břitová destička CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.), a to objem  $102500 \text{ mm}^3$  materiálu. Destička CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.) dokázala odebrat  $53125 \text{ mm}^3$  a vyměnitelná břitová destička firmy Seco Tools, s.r.o. CNMG 120408 - M5 dokázala odebrat  $76250 \text{ mm}^3$  materiálu.

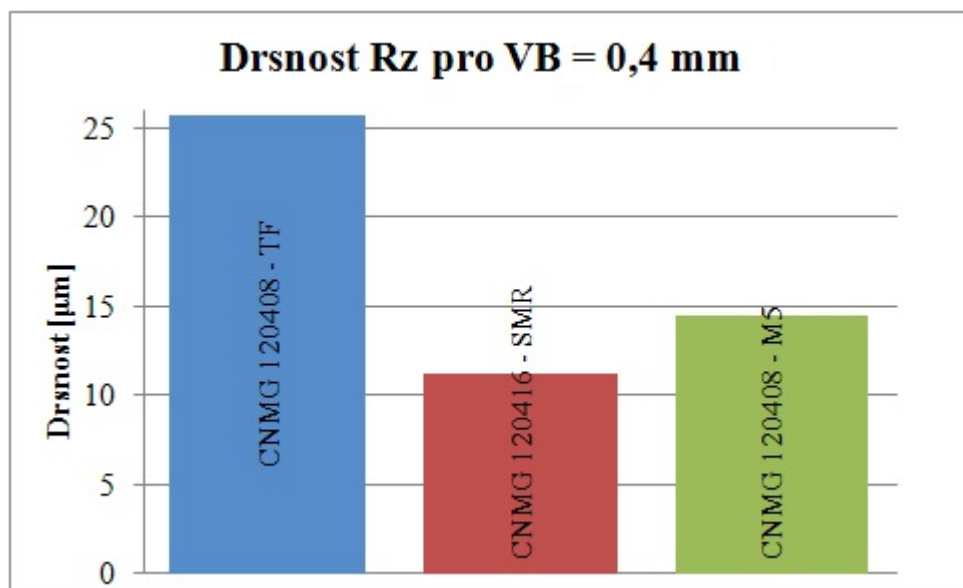
Na grafu 6.9 jsou uvedeny hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu  $R_a$  dosažené při soustružení Inconelu 625 jednotlivými břitovými destičkami při zvolených řezných podmínkách. Hodnoty jsou výslednicí průběhu hodnot drsnosti do dosaženého zvoleného kritéria opotřebení hřbetu  $VB = 0,4$  mm.

Graf 6.9 Srovnání drsnosti  $R_a$  pro  $VB = 0,4$  mm



Nejlepší dosažená průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a = 3,1$   $\mu\text{m}$  byla pro destičku CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.). Destička CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.) dosáhla drsnosti  $R_a = 3,25$   $\mu\text{m}$  a vyměnitelná břitová destička CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.) dosáhla hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu  $R_a = 6,3$   $\mu\text{m}$ .

Na následujícím grafu 6.10 jsou uvedeny výběrové průměry největších výšek profilu  $R_z$  naměřených do dosaženého zvoleného kritéria opotřebení hřbetu  $VB = 0,4$  mm. Kde z hodnot na grafu 6.10 je zřejmé, že destička CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.) dosáhla nejnížší hodnoty největší výšky profilu  $R_z = 11,2$   $\mu\text{m}$ , druhé nejnížší hodnoty dosáhla destička CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.)  $R_z = 14,45$   $\mu\text{m}$ . Jako nejhorší z pohledu největší výšky profilu byla destička CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.)  $R_z = 25,6$   $\mu\text{m}$ .

Graf 6.10 Srovnání drsnosti Rz pro  $VB = 0,4 \text{ mm}$ 

## 7. Technicko - ekonomické zhodnocení

Technicko - ekonomické zhodnocení bylo provedeno pro ceny destiček a množství odebraného materiálu, jelikož se při testování destiček zvolilo hrubovací soustružení, které spočívá v odebrání co nejvíce materiálu za co nejkratší dobu obrábění. Porovnání je tedy provedeno na základě množství odebraného materiálu, které bylo určeno na  $V_c = 1000000 \text{ mm}^3$  a ceny destiček pro posuv  $f_{n1} = 0,3 \text{ mm}$ , kde bylo určeno  $VB = 0,3 \text{ mm}$  a pro  $f_{n2} = 0,5 \text{ mm}$  bylo určeno  $VB = 0,4 \text{ mm}$ .

Tab. 7.1 Ceny vyměnitelných břitových destiček

Výrobce	Destička	Cena [kč/ks]
Iscar s.r.o.	CNMG 120408 - TF	219
Sandvik s.r.o.	CNMG 120416 - SMR	281
Seco Tools s.r.o.	CNMG 120408 - M5	270

### Ekonomické zhodnocení pro posuv $f_{n1} = 0,3 \text{ mm}$

Počet destiček do odebrání  $1000000 \text{ mm}^3$  materiálu pro  $VB = 0,3 \text{ mm}$

Tab. 7.2 Čas a objem odebraného materiálu pro  $VB = 0,3 \text{ mm}$ 

VBD	T	V
	[min]	[mm <sup>3</sup> ]
CNMG 120408 - TF	8	300000
CNMG 120416 - SMR	7,35	275625
CNMG 120408 - M5	3,75	140625



Počet destiček pro CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.):

$$P = V_c / V$$

$$P = 1000000 / 300000$$

$$P = 3,33 \text{ ks} \Rightarrow 4 \text{ ks}$$

Počet destiček pro CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.):

$$P = V_c / V$$

$$P = 1000000 / 275625$$

$$P = 3,63 \text{ ks} \Rightarrow 4 \text{ ks}$$

Počet destiček pro CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.):

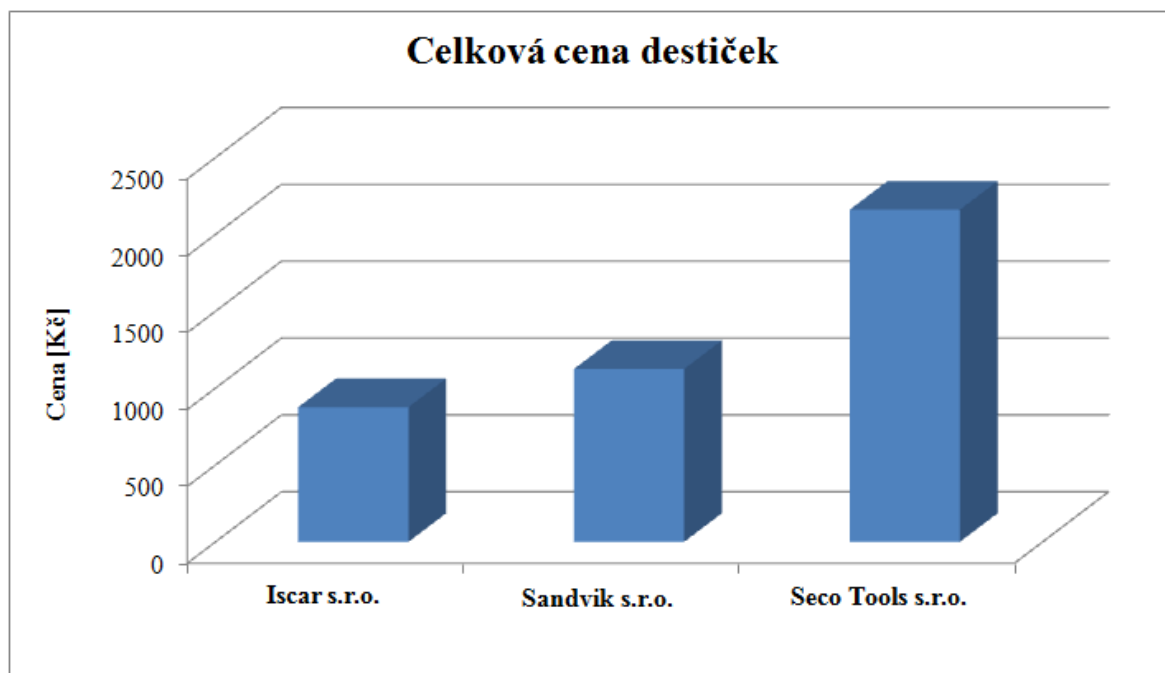
$$P = V_c / V$$

$$P = 1000000 / 140625$$

$$P = 7,11 \text{ ks} \Rightarrow 8 \text{ ks}$$

#### Celková cena destiček

Graf 7.1 Srovnání celkové ceny destiček pro  $f_{nl} = 0,3 \text{ mm}$



Nejnižší cena 876 Kč je u destiček CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.), kterých bylo použito celkem 4 ks, druhé nejnižší celkové ceny 1124 Kč dosáhly destičky CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.), kterých bylo použito celkem také 4 ks. Celkové nejvyšší ceny 2160 Kč dosáhly destičky CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.), kterých bylo použito 8 ks.



**Ekonomické zhodnocení pro posuv  $f_{n2} = 0,5$  mm**Počet destiček do odebrání 1000000 mm<sup>3</sup> materiálu pro VB = 0,4 mm*Tab. 7.3 Čas a objem odebraného materiálu pro VB = 0,4 mm*

VBD	T	V
	[min]	[mm <sup>3</sup> ]
CNMG 120408 - TF	1,64	102500
CNMG 120416 - SMR	0,85	53125
CNMG 120408 - M5	1,22	76250

Počet destiček pro CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.):

$$P = V_c / V$$

$$P = 1000000 / 102500$$

$$P = 9,76 \text{ ks} \Rightarrow 10 \text{ ks}$$

Počet destiček pro CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.):

$$P = V_c / V$$

$$P = 1000000 / 53125$$

$$P = 18,83 \text{ ks} \Rightarrow 19 \text{ ks}$$

Počet destiček pro CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.):

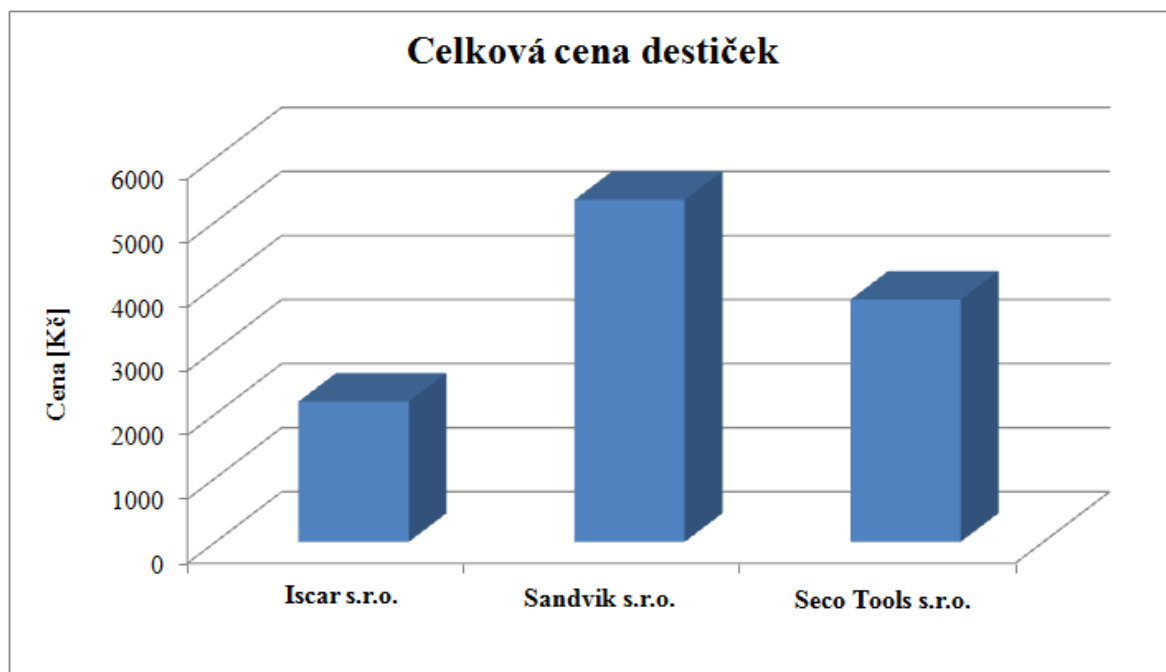
$$P = V_c / V$$

$$P = 1000000 / 76250$$

$$P = 13,12 \text{ ks} \Rightarrow 14 \text{ ks}$$

**Celková cena destiček**

Na následujícím grafu 7.2 je vidět, že nejnižší cena 2190 Kč je u destiček CNMG 120408 - TF (Iscar s.r.o.), kterých bylo použito 10 ks, druhé nejnižší celkové ceny 3780 Kč dosáhly destičky CNMG 120408 - M5 (Seco Tools s.r.o.), kterých bylo použito 14 ks. Celkové nejvyšší ceny 5339 Kč dosáhly destičky CNMG 120416 - SMR (Sandvik s.r.o.), kterých bylo použito na odebrání 1000000 mm<sup>3</sup> celkem 19 ks.

Graf 7.2 Srovnání celkové ceny destiček pro  $f_{n2} = 0,5 \text{ mm}$ 

## Závěr

Diplomová práce se zabývala testováním břitových destiček při obrábění materiálu Inconel 625. Tento materiál patří mezi niklové superslitiny, které se vyznačují dlouhodobou pevností a odolností proti korozi za zvýšených teplot. Při obrábění těchto materiálů hovoříme o těžkoobrobitelných materiálech a to z důvodů jejich vyšší tažnosti, vyšším sklonům k deformačnímu zpevnění a nižší tepelné vodivosti než u ocelí.

Cílem práce bylo testování tří vyměnitelných břitových destiček, které byly doporučeny svými výrobci. V našem případě se jednalo o břitovou destičku CNMG 120408 - TF, IC 806 od firmy Iscar s.r.o., CNMG 120416 - SMR, GC 1115 od firmy Sandvik s.r.o. a o břitovou destičku CNMG 120408 - M5, TM 4000 od firmy Seco Tools s.r.o. Současné s opotřebením byla kontrolována i drsnost Ra a Rz obrobené plochy.

Pro testování břitových destiček bylo nutné vybrat krátkodobou zkoušku z důvodu menší časové náročnosti a také s ohledem na vzniklou finanční náročnost experimentu na obráběný materiál při použití dlouhodobé zkoušky. Jako vhodný obráběcí stroj byl zvolen cnc soustruh Mori Seiki SL - 403. Testování probíhalo na stroji za konstantních řezných podmínek, kdy se měnil pouze posuv, u kterého byly použity dvě hodnoty. Snímky opotřebení břitových destiček byly zaznamenány digitálním mikroskopem Deluxe a měření opotřebení bylo realizováno pomocí programu MotiC Images Plus 2.0 ML. Drsnost povrchu byla měřena pomocí dotykového přístroje na měření drsnosti SurfTest SJ - 210 od firmy Mitutoyo.

Výsledky měření byly tabelárně a graficky zpracovány, v případě grafů závislosti opotřebení na čase je umožněn přímý odečet opotřebení, pro stanovení aktuálního opotřebení v daném čase. Výsledky byly vyhodnocovány pro dvě hodnoty posuvu, kde u každé byla vybrána jiná hodnota opotřebení hřbetu a to z důvodu, kdy u prvního posuvu nedosáhla nejlepší destička vyšší hodnoty než  $VB = 0,3\text{ mm}$ . U druhého posuvu docházelo ke vzniku a následnému odlamování nárůstků u všech tří břitových destiček a hodnota opotřebení byla stanovena na  $VB = 0,4\text{ mm}$ . Pro  $f_{n1} = 0,3\text{ mm}$ , byla stanovena hodnota opotřebení  $VB = 0,3\text{ mm}$  a pro  $f_{n2} = 0,5\text{ mm}$  hodnota  $VB = 0,4\text{ mm}$ .

Na základě zjištěných výsledků měření je doporučeno pro posuv  $f_{n1} = 0,3\text{ mm}$  použít destičku CNMG 120408 - TF od firmy Iscar s.r.o., která dosáhla nejnižších hodnot opotřebení, nejlepší drsnosti povrchu a je nabízena za nejlevnější cenu. Jako druhá nejlepší byla zvolena destička CNMG 120416 - SMR od firmy Sandvik s.r.o., která dosahovala srovnatelných hodnot opotřebení, ale měla zdaleka nejvyšší hodnoty drsnosti a je nabízena za

vyšší cenu. Jako nejhorší skončila destička CNMG 120408 - M5 od firmy Seco Tools s.r.o., která dosahovala polovičního času do opotřebení  $VB = 0,3$  mm než předchozí destičky.

Pro posuv  $f_{n2} = 0,5$  mm jsou výsledky zkreslující, jelikož na všech třech destičkách docházelo k tvorbě a následnému vylamování nárůstku. Nejlepších hodnot času do  $VB = 0,4$  mm dosahovala destička od firmy Iscar s.r.o., ale měla nejhorší výsledky drsnosti. Tato destička by byla nejvhodnější, pokud by se jednalo jen o hrubovací soustružení, kde by se bral ohled jen na čas obrábění do  $VB = 0,4$  mm a cenu destiček a nebral by se ohled na drsnost vzniklého povrchu. Při zohlednění času, drsnosti a ceny břitových destiček je doporučena destička od firmy Seco Tools s.r.o. která měla vyšší čas, srovnatelnou drsnost a nižší cenu destiček než od firmy Sandvik s.r.o.

## Použitá literatura

- [1] JONŠTA, Zdeněk. *Žárupevné oceli a slitiny*. Žilina: ZUSI, 2002. 389 s. ISBN 80-968605-6-9.
- [2] Periodická tabulka, *Nikl*. [online], [cit. 2012-12-02]. Dostupné na WWW: < <http://www.prvky.com/28.html> >
- [3] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
- [4] DARECKÝ Janusz. *Superzliatiny niklu a ich obrábanie*. Žilina: Žilinská univerzita / Monografie, 2001. 107 s. ISBN 80-7100-785-4.
- [5] NESLUŠAN, Miroslav; CZÁN, Andrej. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001, 193 s. ISBN 80-7100-933-4.
- [6] BRADLEY, Elihu F. *Superalloys: A Technical Guide*. ASM International, 1989. 280 s. ISBN-10 0871703270.
- [7] DURAND-CHARRE, Madeleine. *The Microstructure of Superalloys*. Gordon & Breach Science Publishers, Amsterdam, 1997. 121 s. ISBN-10 9056990977.
- [8] ŠMÍD, M. *Stanovení zkrácených cyklických deformačních křivek superslitiny Inconel 738LC při zvýšených teplotách. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 62 s.
- [9] PODRÁBSKÝ, Tomáš; NĚMEC, Karel; JULIŠ, Martin. *Neželezné kovy a jejich slitiny II: doplnění a rozšíření přednášky "Strojírenské materiály" z předmětu BUM*. 2008. 35 s.
- [10] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Obrobitelnost. *MM Průmyslové spektrum*, 2011 / 12, str. 58. Kód článku: 111218.
- [11] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Obrobitelnost nerezových ocelí. *MM Průmyslové spektrum*, 2012 / 1, str. 76. Kód článku: 120114.
- [12] Sandvik Coromant s.r.o. *Skupiny obráběných materiálů*. [online], [cit. 2013-03-07]. Dostupné na WWW: < [http://www.sandvik.coromant.com/cs\\_cz/knowledge/materials/workpiece\\_materials/workpiece\\_material\\_groups/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx) >
- [13] Sandvik Coromant s.r.o. *ISO S HRSA a titan*. [online], [cit. 2013-03-07]. Dostupné na WWW: < [http://www.sandvik.coromant.com/cs\\_cz/knowledge/materials/workpiece\\_materials/iso\\_s\\_hrsa\\_titanium/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_s_hrsa_titanium/pages/default.aspx) >
- [14] The Special Metals Corporation group of companies. *Machinig Special Metals Corporation Products* [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z WWW: < <http://www.specialmetals.com/documents/machining.pdf> >

- [15] ČSN ISO 513 (220801). *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostřím - Označování skupin a podskupin použití*. 2006.
- [16] HUMÁR, A. *Technologie I – technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s.
- [17] MIKOVEC, Miroslav. *Obrábění materiálů s velkou tvrdostí a pevností*, Praha: SNTL, 1982. 196 s.
- [18] MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů 1. část. 1. vydání*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1999. 142 s. ISBN 80-7078-624-8.
- [19] Sandvik Coromant s.r.o. *Geometrie břitové destičky*. [online], [cit. 2013-03-09]. Dostupné na WWW: < [http://www.sandvik.coromant.com/cs\\_cz/knowledge/general\\_turning/getting\\_started/choice\\_of\\_insert/insert\\_geometry/pages/default.aspx#3](http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/general_turning/getting_started/choice_of_insert/insert_geometry/pages/default.aspx#3) >
- [20] Sandvik Coromant s.r.o. *Tvar destičky*. [online], [cit. 2013-03-09]. Dostupné na WWW: < [http://www.sandvik.coromant.com/cs\\_cz/knowledge/general\\_turning/getting\\_started/choice\\_of\\_insert/insert\\_shape/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/general_turning/getting_started/choice_of_insert/insert_shape/pages/default.aspx) >
- [21] Sandvik Coromant s.r.o. *Poloměr hrotu*. [online], [cit. 2013-03-09]. Dostupné na WWW: < [http://www.sandvik.coromant.com/cs\\_cz/knowledge/general\\_turning/getting\\_started/choice\\_of\\_insert/nose\\_radius/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/general_turning/getting_started/choice_of_insert/nose_radius/pages/default.aspx) >
- [22] Sandvik Coromant s.r.o. *Životnost nástroje*. [online], [cit. 2013-03-09]. Dostupné na WWW: < [http://www.sandvik.coromant.com/cs\\_cz/knowledge/general\\_turning/getting\\_started/tool\\_life/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/general_turning/getting_started/tool_life/pages/default.aspx) >
- [23] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Proces obrábění kovů - životnost nástrojů. *MM Průmyslové spektrum*, 2012 / 7, str. 58. Kód článku: 120705.
- [24] FOREJT, M., HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANÍČEK, L. *Experimentální metody: Syllabus*, VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 83 s.
- [25] JURKO, J.: *Opatrebenie rezných nástrojov*, Prešov, 2005, ISBN 80-8073-255-8
- [26] ISO 3685 : 1990. *Tool Life Testing With Single Point Turning Tools*. 1990
- [27] BILÍK, O.: *Obrábění II*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5
- [28] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha: STNL-nakladatelství technické literatury, 1989. 340 s.
- [29] TICHÁ, Š. *Strojírenská technologie: část 1*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 112 s. ISBN 80-248-06711.
- [30] DMG/Mori Seiki. *SL-403*. [online], [cit. 2013-03-15]. Dostupné na WWW: < <http://www.dmgmoriseikiusa.com/sl-series/sl-403> >
- [31] BIBUS. *Niklové slitiny*. [online], [cit. 2013-03-15]. Dostupné na WWW: < [http://new.bibus.cz/pdf/Special\\_Metals/Nikl/Niklove\\_slitiny.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf) >

- [32] The Special Metals Corporation group of companies. *Machinig Special Metals Corporation Products* [online]. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z WWW: < <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf> >
- [33] Sandvik Coromant s.r.o. *Výrobek C5-DCLNR-35060-12*. [online], [cit. 2013-03-16]. Dostupné na WWW: < [http://coroguide.sandvik.coromant.com/infotype/infomain.asp?langid=CZE&extid=29208&tableid=tblArticle&Type=Product&Prod\\_code=C5-DCLNR-35060-12](http://coroguide.sandvik.coromant.com/infotype/infomain.asp?langid=CZE&extid=29208&tableid=tblArticle&Type=Product&Prod_code=C5-DCLNR-35060-12) >
- [34] Iscar s.r.o. *ISO Turn*. [online], [cit. 2013-03-16]. Dostupné na WWW: < <http://www.iscar.com/Ecat/familyhdr.asp?fnum=60&app=970&mapp=IS&GFSTYP=M&lang=EN&type=1> >
- [35] Sandvik Coromant s.r.o. *Soustružnické nástroje - Všeobecné soustružení*. [online], [cit. 2013-03-16]. Dostupné na WWW: < [http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/turn\\_a.pdf](http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/turn_a.pdf) >
- [36] Seco Tools s.r.o. *Soustružení*. [online], [cit. 2013-03-20]. Dostupné na WWW: < [http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2\\_2011/MN/turning/Turning%202012\\_CZ\\_LR.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2_2011/MN/turning/Turning%202012_CZ_LR.pdf) >
- [37] Seco Tools s.r.o. *SECOLOR SELECTION GUIDE*
- [38] ExaSoft Holding a.s. *Celestron ruční digitální Mikroskop II (44302-A)*. [online], [cit. 2013-03-20]. Dostupné na WWW: < [http://www.exasoft.cz/celestron-rucni-digitalni-mikroskop-ii-44302-a-\\_d67153.html](http://www.exasoft.cz/celestron-rucni-digitalni-mikroskop-ii-44302-a-_d67153.html) >
- [39] Unimetra s.r.o. *Drsnoměry a vzorkovnice drsnosti*. [online], [cit. 2013-03-20]. Dostupné na WWW: < [http://www.unimetra.cz/soubory\\_zbozi/80\\_1.pdf](http://www.unimetra.cz/soubory_zbozi/80_1.pdf) >